



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**HODNOCENÍ DYNAMICKÉHO POŠKOZENÍ
KOMPOZITNÍ KONSTRUKCE**

EVALUATION OF DYNAMIC DAMAGE OF COMPOSITE STRUCTURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Peter Štefanovič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Klement, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Peter Štefanovič**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Stavba letadel
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Klement, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Hodnocení dynamického poškození kompozitní konstrukce

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kompozitní konstrukce jsou citlivé na poškození rázem, které se na rozdíl od kovových konstrukcí neprojeví plastickou deformací, ale může vyvolat skrytou delaminaci kompozitu. Rázové poškození může být způsobeno pádem nástroje, cizími tělesy, např. kameny na dráze, krupobitím za letu apod. Pro zkoušku rázem (impact test) se běžně používá zkouška dopadem závaží určité hmotnosti s proměnnou rychlostí. Tato zkouška je rovněž nutnou částí zkoušky tlakem po nárazu. Práce je zaměřena na zpracování a praktické ověření metodiky rázových zkoušek vybraných kompozitních materiálů a jejich nedestruktivní kontroly.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je navrhnout vhodnou metodiku nízkorychlostních rázových zkoušek kompozitních vzorků a metodiku ověřit experimentálně na vybraných kompozitních materiálech. Součástí metodiky je návrh zkušebních vzorků, zkušebního přípravku, hmotnosti impaktoru, parametrů zkoušky a způsob nedestruktivní kontroly rozsahu vnitřního poškození. Výsledky experimentálního výzkumu budou porovnány s teoretickou analýzou.

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook, Volume 21, Composites. ASM International. Material Park, Ohio, 2002. ISBN 0-87170-703-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 6. 11. 2017

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Prvá časť tejto práce s názvom „Hodnocení dynamického poškození kompozitní konstrukce“ sa zameriava na návrh zariadenia pre dopadové experimenty a vhodné laminátové vzorky vyrobené z prepregov. Takisto sa tu demonštrujú podmienky a problematika rázových skúšok.

Druhá časť práce rozoberá nedeštruktívnu kontrolu poškodených vzoriek na základe termovízie. Jedná sa hlavne o rozsah vady v znehodnotenej oblasti a vyhodnotenie výsledkov pomocou metódy impulznej odrazovej infračervenej termovízie.

Na záver sa porovnávajú relatívne odchýlky vo vyhodnocovaní veľkosti trhlín medzi vizuálnou metódou a termovíziou. Následne sa posudzuje zvyšná pevnosť poškodených vzoriek voči nepoškodeným pomocou ohybových skúšok.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Kompozitný materiál, prepreg, padostroj, vzorka, rázová skúška, termovízia, ohybová skúška.

ABSTRACT

The first part of the diploma thesis with name „Evaluation of dynamic damage of composite structure“ focuses on designing device for impact experiments and suitable laminate samples made from prepregs. The conditions and problems of impact tests are also demonstrated here.

The second part of the thesis deals with non-destructive control of damaged specimens based on thermography. This is mainly the extent of defects in the impaired area and the evaluation of results using the pulse infrared thermography method.

Finally, the relative deviation in the crack size comparison between the visual method and thermographic are compared. Consequently, the residual strength of the damaged samples against undamaged specimens are compared using bending tests.

KEYWORDS

Composite material, prepreg, drop tester, specimen, impact test, thermography, flexural test.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠTEFANOVIČ, P. *Hodnocení dynamického poškození kompozitní konstrukce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Klement, CSc.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu s názvom **Hodnocení dynamického poškození kompozitní konstrukce** vypracoval samostatne pod vedením doc. Ing. Josefa Klementa, CSc. s použitím odbornej literatúry uvedenej v zozname použitých zdrojov.

Dátum

Bc. Peter Štefanovič

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu práce, pánovi doc. Ing. Josefovi Klementovi, CSc., za jeho nesmiernu ochotu, poznatky, pripomienky, usmernenia a cenné rady, vďaka ktorým bola táto práca ešte zaujímavejšia, a za jeho odhodlanie a nadšenie predať ďalej svoje dlhoročné skúsenosti a vedomosti. Ďalej by som chcel poďakovať Ing. Václavovi Jetelovi za jeho čas, pomoc a spoluprácu pri nedeštruktívnom vyhodnocovaní výsledkov z experimentov.

V neposlednom rade by som chcel poďakovať svojej rodine a blízkym za pomoc a podporu počas celého môjho štúdia nielen na vysokej škole.

OBSAH

ABSTRAKT	5
ÚVOD	13
1 PROBLEMATIKA RÁZOVÝCH SKÚŠOK	15
1.1 Používané metódy skúšok	15
1.1.1 Princíp rázových skúšok dopadom	15
1.1.2 Princíp ohybových skúšok	18
1.2 Aparatúra a vzorky	20
1.2.1 Zariadenie pre rázové skúšky	20
1.2.2 Sériovo vyrábané padostroje	22
1.2.3 Zariadenia pre ohybové skúšky	24
1.2.4 Doporučené vzorky z kompozitných materiálov	25
1.3 Nedeštruktívna kontrola vnútorného poškodenia	26
1.3.1 Vizuálna metóda	26
1.3.2 Ultrazvuková metóda	27
1.3.3 Termovízna metóda	28
2 NÁVRH ZARIADENIA A VZORIEK	31
2.1 Konštrukčný návrh zariadenia	31
2.1.1 Návrh impaktora	32
2.1.2 Podstavec	32
2.2 Skúšobné vzorky	32
2.2.1 Postup výroby a vytvrdzovania v prípravku	33
3 RÁZOVÉ SKÚŠKY	37
3.1 Priebeh experimentov	37
3.2 Výsledky	38
4 NDT – TERMOVÍZIA	41
4.1 Priebeh experimentov	41
4.2 Spracovanie údajov pre hodnotenie výsledkov	42
4.3 Výsledky	44
5 OHYBOVÉ SKÚŠKY	47
5.1 Priebeh experimentov	47
5.2 Teoretické výsledky	48
5.3 Praktické výsledky	49
6 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV	51
6.1 Porovnanie vizuálnej a termovíznej kontroly	51
6.2 Zhodnotenie ohybových skúšok	51
ZÁVER	53

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	55
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV	58
ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK	59
ZOZNAM TABULIEK.....	60
ZOZNAM PRÍLOH	61

ÚVOD

Diplomová práca sa bude primárne venovať problematike a metodike nízkorychlostných rázových skúšok s obmedzením na kompozitné materiály s vystuženými uhlíkovými a sklenenými vláknami. Poškodenie konštrukcie dopadom telesa s malou rýchlosťou môže byť zapríčinené napríklad krupobitím, malými kamienkami zo vzletovej a pristávacej dráhy, alebo pádom opravárenského nástroja na poťah konštrukcie pri vykonávaní údržby. Rázové experimenty ďalej môžu byť i vysokorychlostné (veľká energia dopadového telesa pôsobiaca na plochu), ktorými sa simuluje napríklad náraz vtákov na konštrukciu, alebo rôzne balistické poškodenia. Táto problematika však prevyšuje primárny rámec tejto diplomovej témy a preto nie je ďalej rozoberaná.

Prvá časť tejto práce rozoberá a popisuje metódu nárazu padajúceho telesa na vzorku. Jedná sa o dynamické poškodenie, ktoré je v skutku veľmi nebezpečné hlavne z toho dôvodu, že okamžitá pôsobiaca sila môže zapríčiniť bleskovú deštrukciu materiálu, ktorá by pri statickom zaťažení nikdy nenastala. To znamená, že koncentrovaná sila v určitom bode s veľmi krátkou účinnosťou úzko súvisí s deformačnými vlastnosťami materiálu – schopnosti náhle absorbovať energiu. Pri dynamickej skúške sa materiály stávajú krehkejšie so zvyšujúcim sa zaťažením, kedy porušenie nastane už pri malom priehybe. Tento fakt neplatí pri statickom zaťažovaní (napríklad ohybom), pretože znehodnotenie vzorky prebehne postupne až pri extrémnom priehybe. Lomy vzniknuté v dôsledku malých rýchlostí namáhania sa premieňajú z ťažných na lomy krehké.

Nutnou súčasťou popisovaných nízkorychlostných rázových skúšok býva aj vyhodnocovanie stlačenia po náraze – v práci je však zohľadnená a vykonaná metóda ohybových experimentov pre posúdenie zvyšnej pevnosti voči novým nedeformovaným vzorkám. Respektíve porovnávali sa poškodené vzorky s nepoškodenými z dôvodu zisťovania vplyvu veľkosti porušenej oblasti na výsledné mechanické vlastnosti daného materiálu. Na konci prvej kapitoly sú uvedené štandardizované postupy nedeštruktívneho testovania, ktoré budú použité v experimentálnej časti práce na vyhodnotenie výsledkov z rázových skúšok. Takmer vždy sa jedná o kombináciu viacerých metód, minimálne dvoch, pričom hneď prvú bude predstavovať vizuálna kontrola.

Ďalšia kapitola sa zaoberá konštrukčným návrhom zjednodušeného zariadenia pre dopadové testy, tzv. padostroja, a potom aj návrhom a tvorbou vhodných kompozitových vzoriek. Hlavný námet na padostroj bol čerpaný z aparátúr použitých vo vedeckých prácach s rovnakým zameraním, keďže musela byť zachovaná podstata využitia tiažového zrýchlenia k urýchleniu padajúceho závažia s impaktorom (pologuľatým ukončením tyče, ktorá dochádza do kontaktu s povrchom testovaného telesa). Celé zariadenie bolo koncipované minimalistickým štýlom, kedy aj podstavec na uchytenie vzoriek pozostával z dutého valcového tvaru. Namiesto zložitého tvaru podstavca so svorkovými príchytkami sa zvolil jednoduchý valec, pretože k splneniu funkcie to bolo dostačujúce a vzorky boli uspôsobené svojimi rozmermi skôr pre dodatočné ohybové skúšky ako pre tlakové testy po náraze. Dôvod bol prostý: ušetrený materiál na väčšie vzorky sa mohol použiť k produkcii viac kusov menších vzoriek, navyše okrem čistých typov kompozitových telies vznikla hybridná verzia kombinujúca sklenené a uhlíkové prepregy.

Tretou kapitolou sa začína praktická časť, čiže experimenty s rázovými skúškami, kde sa popisuje postup merania v jednotlivých krokoch na navrhnutom a skonštruovanom padostroji. Následne sa kontroluje a dokumentuje poškodená oblasť čisto vizuálnou metódou, pričom boli klasifikované povrchové vady vo forme trhlín. V rámci vizuálnej kontroly sa trhliny vyhodnotili a premerali s pomocou posuvného meradla v dvoch hlavných smeroch ich šírenia – v priečnom a v pozdĺžnom smere voči okrajom vzoriek.

Vo štvrtjej kapitole sa využíva na kontrolu rozsahu znehodnotenej oblasti nedeštruktívna vyhodnocovacia metóda, konkrétne termovízia, aby sa dosiahli hodnotnejšie informácie nielen ohľadom povrchových deformácií, ale aj podpovrchových delaminácií. Takisto je tu vysvetlený názorný priebeh spôsobu merania pri použití profesionálnej termokamery, pričom vyhodnotenie muselo prebehnúť až formou dodatočných úprav na odpovedajúcom programe. Až konečné spracovanie údajov vhodnou analýzou poskytlo dostatočne kvalitné obrázky pre hodnotenie finálnych poškodení.

Piata kapitola poukazuje na dodatočné ohybové experimenty, ktoré nahradili tlakové skúšky po náraze z dôvodu nedostatku adekvátnej techniky. Náhrada bola ale bezpodmienečne dostačujúca pre posúdenie zvyšnej pevnosti poškodených vzoriek voči nepoškodeným pri testoch orientovaných na maximálne ohybové sily, pri ktorých sa vzorky totálne znehodnotili.

V poslednej kapitole sa nachádzajú záverečné hodnotenia dosiahnutých výsledkov, predovšetkým porovnanie relatívnych odchýlok pri hodnotení veľkosti trhlin medzi vizuálnou metódou a termovíziou. Pri oboch metódach sa našli určité limity, ktoré majú za následok nekvalitnú interpretáciu a skreslenie výsledku. V neposlednom rade sa v poslednej časti práce posudzuje relatívna závislosť síl a napätí z ohybových skúšok ako funkcia narastajúcej energie nárazu impaktora.

1 PROBLEMATIKA RÁZOVÝCH SKÚŠOK

Dynamické skúšky predstavujú neoddeliteľnú súčasť vyhodnocovania mechanických vlastností a materiálových charakteristík. Nastáva pri nich poškodzovanie súdržnosti materiálu aj potom, čo pôsobiace sily nedosahujú hodnôt statických pevností. Vyznačujú sa rýchlym zaťažovaním buď so skokovou zmenou, alebo s určitým opakovaním. Preto tieto dynamické namáhania možno rozdeliť do dvoch základných skupín, ktorými sú:

- rázové namáhanie
 - sila pôsobí na vzorku nárazovo len na zlomok sekundy
 - vyšetrujú ho rázové skúšky
- cyklické namáhanie
 - sila pôsobí na vzorku opakovane aj niekoľkokrát za sekundu
 - zaoberajú sa ním únavové skúšky

1.1 Používané metódy skúšok

Rázové skúšky zisťujú chovanie materiálu v určitých podmienkach pri náhlom náraste namáhania a členia sa podľa spôsobu zaťažovania na skúmanie pevnosti v:

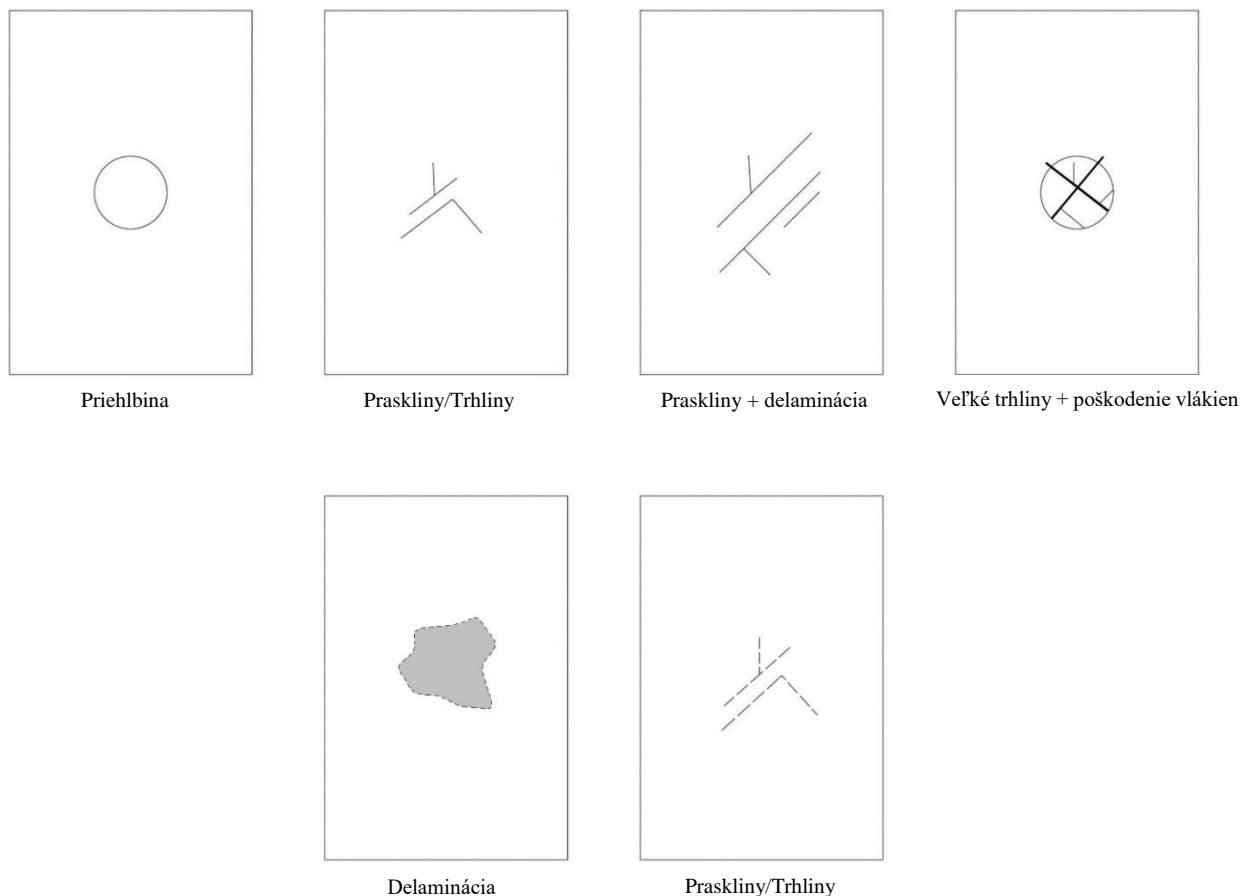
- ťahu
- tlaku
- ohybe
- torze

Najpoužívanejšia a najzmysluplnejšia je skúška rázom v ohybe. Najväčší význam našla predovšetkým pri oceliach, pretože disponujú vysokou húževnatosťou. Húževnatosť je schopnosť materiálu odolať nárazu a následnému ohybu tak, aby po odľahčení bola súčasť v neporušenom stave, teda bez tvorby trhlín. Na určovanie rázovej a vrubovej húževnatosti slúži metóda Charpy alebo Izod. Jediný rozdiel je v tom, že prvom zmienenom spôsobe by mala byť skúšobná vzorka (tyč) uchytená na dvoch podporách, zatiaľ čo tá druhá uvedená metóda navrhuje uloženie vzorky letmo. Špecifickú kategóriu so širšou oblasťou využitia (aj pri kompozitoch) tvoria rázové skúšky dopadom, ktorými sa primárne táto práca zaoberá [6].

1.1.1 Princíp rázových skúšok dopadom

Základná podstata nízkorýchlostných rázových skúšok tenkých kompozitových materiálov sa opiera o americkú technickú normu ASTM D7136/D7136M – 12¹ [2]. Na experimenty sú používané vyvážené, symetricky vrstvené laminátové dosky, na ktoré narazí závažie o zvolenej hmotnosti s impaktorom (koncový hrot s pologuľatým tvarom dopadajúci na povrch vzorky). Závažie spustené z vopred stanovenej výšky kolmo na rovinu telesa dosiahne tesne nad povrchom odpovedajúcu rýchlosť, ktorá vyvodí energiu koncentrovaného nárazu, a to spôsobí poškodenie určitého charakteru. Odolnosť voči znehodnoteniu sa následne vyhodnotí z hľadiska veľkosti (rozsahu) a typu poškodenia. Možné typy porúch vonkajších a aj vnútorných vrstiev charakterizuje názorný obrázok 1-1. Experiment prebieha na zariadení, tzv. padostroj, ktorému sa bude detailnejšie venovať príslušná podkapitola 1.2.1.

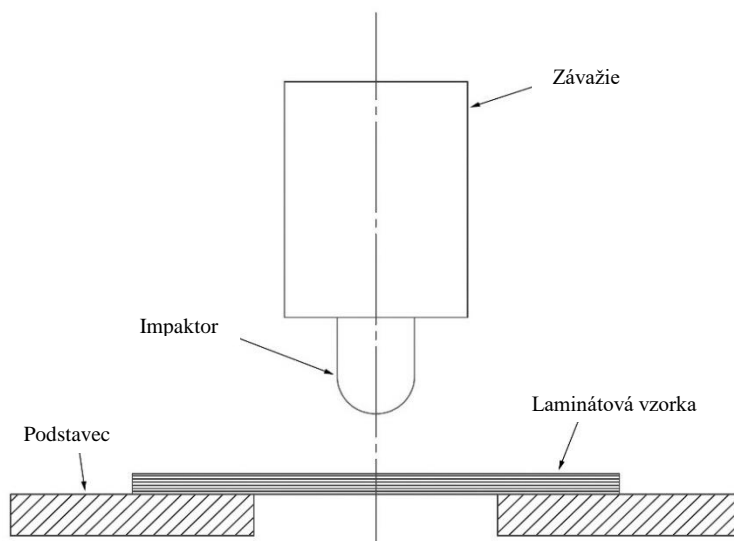
¹ Štandardná metóda na meranie odolnosti kompozitov s vystuženými vláknami a polymérovej matrice v dôsledku nárazu padajúceho závažia



Obr. 1-1 Bežne pozorované typy porúch po rázovej skúške [2]
(Horný rad – viditeľné vonkajšie typy poškodenia; dolný rad – vnútorné typy poškodenia)

Schéma

Všeobecný náčrt podstaty rázovej skúšky (viď obrázok 1-2) spočíva vo vertikálnom pohybe závažia s impaktorom. Na základe využitia tiažového zrýchlenia sa udelí padajúcej hmote dostatočná rýchlosť k premene potenciálnej energie na požadovanú kinetickú. Táto energia je cez impaktor prenesená do vzorky, ktorá ju potom absorbuje a na základe svojich mechanických vlastností vyvodí možné následky (bez následkov, alebo vzniknú priehlbiny, povrchové trhliny, delaminácia atď.).



Obr. 1-2 Princíp rázovej skúšky

Dôležité výpočty

Pre správne nastavenie výšky impaktora od povrchu testovaného telesa treba vychádzať z rovnice potenciálnej energie. Po vyjadrení zo vzťahu (1.1) možno dostať vhodnú výšku pre závažie nachádzajúce sa v padostrojí:

$$h = \frac{E_p}{m g} \quad (1.1)$$

kde:

h je výška, v m;

E_p potenciálna energia, v J;

m hmotnosť závažia s impaktorom, v kg;

g tiažové zrýchlenie, $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

Zo zákona zachovania energie, kedy sa potencionálna rovná kinetickej, by sa dalo predpokladať, že táto rovnosť bude dodržaná. Platí to však za určitých okolností a hlavnou podmienkou je, aby trenie vo vodiacom mechanizme bolo nulové. V praxi ale nemožno tento fakt obísť a tak by vzťah (1.2) pre kinetickú (dopadovú) energiu tesne pred nárazom nadobudol trochu inú hodnotu.

$$E_k = \frac{m v^2}{2} \quad (1.2)$$

kde:

E_k je kinetická energia, v J;

v rýchlosť telesa tesne nad povrchom vzorky, v m/s.

Rýchlosť padajúceho závažia tesne nad povrchom telesa by sa dala zmerať pomocou rýchlomeru nainštalovaného na zložitejšej konštrukčnej aparatúre. Jednoduché stroje však týmto zariadením nedisponujú, ale na priblíženie výsledku dopadovej rýchlosti dobre poslúži teoretický vzorec (1.5) využívajúci podstatu voľného pádu [15]. Uvedené všeobecné rovnice (1.3) a (1.4) reprezentujú kinematiku hmotného bodu pre rovnomerne zrýchlený, priamočiary pohyb.

$$v = v_0 + g T \quad (1.3)$$

$$y = y_0 + v_0 T + \frac{1}{2} g T^2 \quad (1.4)$$

Treba poznamenať, že závažie sa najskôr nachádza v pokoji, čiže počiatočná rýchlosť v_0 bude nulová, a takisto počiatok súradnicovej sústavy môže byť umiestnený do ťažiska padajúceho závažia, takže y_0 bude tiež rovné nule. Potom stačí zo vzorca (1.4) odvodiť čas T , dosadiť ho do predchádzajúcej rovnice (1.3) a namiesto dráhy y nahradiť výšku h . Výsledkom, po drobnej úprave, je rýchlosť zapísaná v nasledujúcom tvare:

$$v = \sqrt{2 g h} \quad (1.5)$$

Poznámka: pre spresnenie výsledkov sa odporúča vykonanie viacerých zopakovaných experimentov v rovnakých podmienkach.

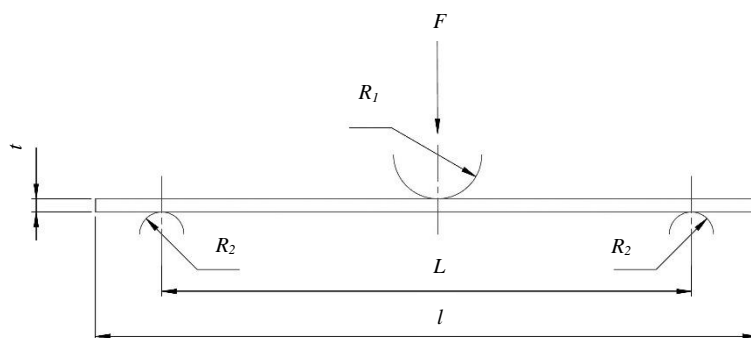
1.1.2 Princíp ohybových skúšok

Všeobecný postup pre statické ohybové skúšky tenkých materiálov je popísaný normou ČSN EN ISO 14125², eventuálne ASTM D6272 – 02³ [4, 5]. Hlavný princíp spočíva v ohýbaní vzoriek pomocou skúšobného prípravku v náležitom zariadení pri konštantnej rýchlosti až do porušenia samotného telesa, alebo kým sa nedosiahne vopred stanovená hodnota deformácie, poprípade kým sa vizuálnou metódou nezaznamená náhly nárast trhliny v určitom smere. Posledný uvedený spôsob môže byť použitý len pri kompozitoch so sklenenými vláknami. Meria sa priehyb a zaťažovacia sila a na základe toho sa vyhodnocujú rôzne deformácie v závislosti na napätiach. Takisto je možné stanoviť hodnotu pevnosti v ohybe, ohybového modulu, medzilaminárneho šmykového modulu a iných parametrov.

Poznámka: použitie metódy ohybových testov laminátov v tejto práci je skôr doplnkové, pretože sa ohýba vzorka, ktorá prešla rázovou skúškou. To sa za štandardných okolností nerobí.

Geometria

Testované teleso v tvare hranola je voľne položené na dve podpory, pričom naň pôsobí buď jeden, alebo dva zaťažovacie hroty o určitom polomere – jedná sa o tzv. trojbodový alebo štvorbodový ohyb. Pre trojbodový ohyb (viď obrázok 1-3) platí, že najväčší účinok ohybového momentu sa sústreďuje do stredu telesa, kde bude aj najvyššie napätie. Tento model zaťažovania nebol ďalej rozvídzaný ani demonštrovaný, pretože účinok sily v oblasti poškodenia po rázovej skúške by viedol k jasnej deštrukcii vzorky vplyvom tejto sily.



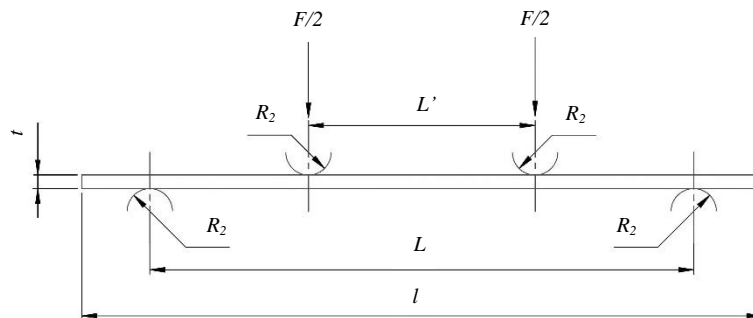
Obr. 1-3 Geometria usporiadania pri trojbodovom ohybe [2]

Naopak štvorbodovému ohybu (viď obrázok 1-4) bola v experimentálnej časti práce venovaná vyššia pozornosť práve z dôvodu sledovania chovania vlákien v mieste, kam dopadol impaktor. Táto oblasť sa nachádza presne medzi dvoma prostrednými zaťažovacími hroty, kde je zaistený konštantný ohybový moment. Takisto tlakové kontaktné napätia v tejto zóne sú nižšie na rozdiel od trojbodového ohybu.

Geometria vychádza z platnosti, že vzdialenosť medzi valcovými hroty L' sa rovná $1/3$ vzdialenosti podpier L . Rozteč medzi podporami pri trojbodovom a štvorbodovom zaťažovaní by mala byť identická. Polomery nadobúdajú hodnotu pre $R_1 = 5 \pm 0,2$ mm a pre $R_2 = 2 \pm 0,2$ mm do hrúbky vzorky $t \leq 3$ mm, prípadne $R_2 = 5 \pm 0,2$ mm pre $t \geq 3$ mm. Prijateľné hodnoty pre pomery L/t sú 16:1, 32:1, 40:1 a v nezvyčajných prípadoch až 60:1.

² Vláknami vystužené plastové kompozity – Stanovenie ohybových vlastností

³ Štandardná metóda ohybových vlastností nevystužených a vystužených plastov a elektrických izolačných materiálov pri štvorbodovom ohybe



Obr. 1-4 Geometria usporiadania pri štvorbodovom ohybe [2]

Dôležité výpočty

K najrelevantnejším teoretickým výpočtom sa zaradi veľkosť ohybového napätia, ktorá podlieha výsledku z nasledujúcej rovnice (1.6):

$$\sigma_f = \frac{F L}{b t^2} \quad (1.6)$$

kde:

σ_f je ohybové napätie, v MPa;

F sila, v N;

L vzdialenosť podpier, v mm;

b šírka telesa, v mm;

t hrúbka telesa, v mm.

Ďalším dôležitým parametrom je ohybový modul, no najskôr treba vyjadriť priehyby z rovnosti (1.7) a (1.8), ktoré korešpondujú ohybovým deformáciami – tie nadobúdajú hodnoty $\varepsilon_f' = 0,0005$ a $\varepsilon_f'' = 0,0025$. Vzťahy týchto priehybov sú uvedené nižšie:

$$s' = \frac{\varepsilon_f' L^2}{4,7 t} \quad (1.7)$$

$$s'' = \frac{\varepsilon_f'' L^2}{4,7 t} \quad (1.8)$$

kde:

s', s'' sú priehyby v strede telesa, v mm;

$\varepsilon_f', \varepsilon_f''$ ohybové deformácie – ich hodnoty sú spomenuté vyššie.

Modul pružnosti v ohybe sa potom stanoví na základe nastávajúcej rovnice (1.9):

$$E_f = \frac{0,21 L^3}{b t^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad (1.9)$$

kde:

E_f je ohybový modul pružnosti, v MPa;

Δs rozdiel priehybu s'' a s' , v mm;

ΔF rozdiel medzi silou F'' a F' pri s'' a s' , v N.

Maximálne napätie vo vonkajších vláknach v strednom priestore skúšobného telesa by sa dala odhadnúť podľa ďalej predstaveného vzťahu (1.10). Teda platí, že:

$$\varepsilon = \frac{4,7 s t}{L^2} \quad (1.10)$$

kde:

ε je maximálna deformácia vo vonkajších vláknach;

s maximálny priehyb v strede telesa, v mm.

Poznámka: z jednotlivých meraní treba urobiť aritmetický priemer, štandardnú odchýlku a 95 % pravdepodobnosť (pre viacej informácií pozri ISO 2602).

1.2 Aparatúra a vzorky

Na pozorovanie delaminácie tenkých vzoriek kompozitných materiálov sú požadované len malé energie, pretože stredné či väčšie by už mohli spôsobiť značné poškodenie až totálnu deštrukciu, čiže nežiaduci stav. Preto v práci figurujú iba padostroje pre najnižšie možné dopadové energie vhodné na testovanie a hodnotenie dynamického znehodnotenia určitej časti konštrukcie využiteľné nielen v leteckom priemysle.

Po rázových skúškach a následnom nedeštruktívnom vyhodnotení výsledkov bola zvolená ešte iná metóda, ktorou sa ďalej pozorovali ohybové vlastnosti materiálu po poškodení (chovanie a smer šírenia trhliny) a na záver sa porovnali vlastnosti porušených a neporušených vzoriek namáhaných ohybom. Pri univerzálnych skúšobných zariadeniach, ktoré podliehajú prísnyim požiadavkám, sú veľmi podstatné upínacie prípravky.

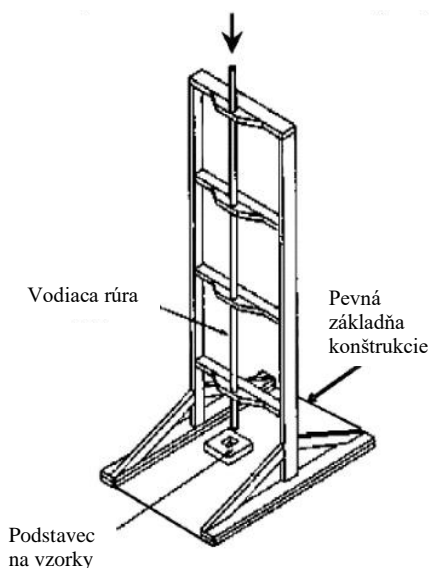
Skúšobné vzorky sú podľa noriem charakteristické doporučenými rozmermi, orientáciou vlákien, počtom vrstiev, zložením a kombináciou tkanív s vystuženými vláknami. Túto náležitú problematiku detailnejšie popisuje podkapitola 1.2.4 zameraná na vhodné vzorky.

1.2.1 Zariadenie pre rázové skúšky

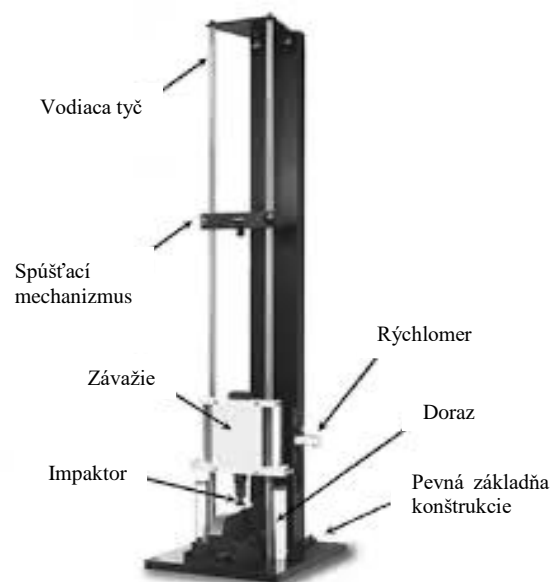
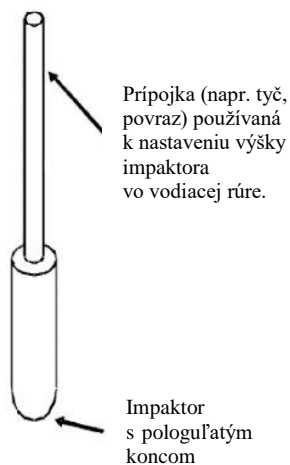
Podľa americkej technickej normy ASTM D7136/D7136M [2] sa rozdeľujú aparatúry padostrojov podľa typu konštrukcie na dva druhy. Princíp činnosti je v zásade rovnaký, padajúce závažie sa môže pohybovať len v jednej osi. Prvý typ zariadenia sa vyznačuje dutou vodiacou rúrou, prevažne s kruhovým alebo štvorcovým prierezom (viď obrázok 1-5), do ktorej sa vloží závažie s impaktorom. Vôľa medzi závažím a vnútorným priemerom valcovej trubice by však nemala presiahnuť 1 mm. Druhý model je charakteristický dvomi alebo viacerými vodiacími tyčami (viď obrázok 1-6), na ktoré je závažie uchytené. V oboch prípadoch však musí byť trenie mechanizmu vedenia zanedbateľné.

Celá konštrukčná aparatúra pozostáva z pevnej základne a rámu, z vodiacej rúry alebo vodiacich tyčí, ďalej z podstavca na vzorky a z padajúceho závažia s impaktorom s pologul'atým koncom. Sofistikovanejšie zariadenia ešte môžu obsahovať navyše spúšťací mechanizmus pre jednoduché uchytenie a odistenie závažia, polohovateľný doraz na zabránenie opätovnému nárazu závažia na vzorku, alebo rôzne pomocné senzory a meradlá, akým je napríklad rýchlomer či silomer. Takisto medzi doplnkové moduly patrí teplotná komora, ktorá umožňuje napodobniť reálny rozsah teplôt napríklad pracovného prostredia celej konštrukcie lietadla.

Impaktor sa umiestni do vodiacej rúry
a pred nárazom sa nastaví na zvolenú výšku pádu.



Obr. 1-5 Konštrukcia s otvorenou vodiacou rúrou [2]



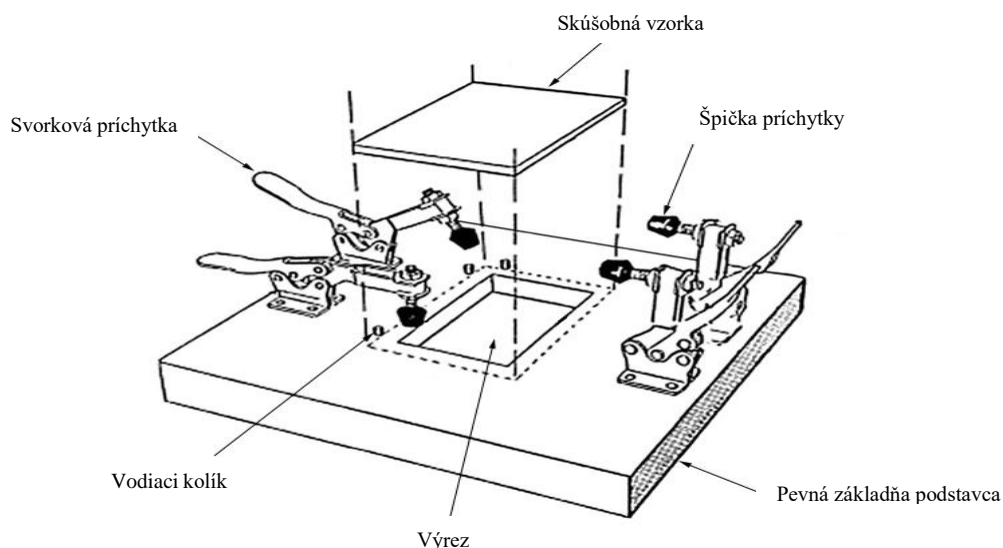
Obr. 1-6 Konštrukcia s vodiacimi tyčami [2]

Prvý typ padostroja disponuje vcelku jednoduchou konštrukciou, avšak pre komerčnejšie alebo výskumné a vývojové účely sa častejšie používa druhý typ. Dôvodom je hlavne fyzicky nenáročná manipulácia, pretože celé zariadenie sa obsluhuje elektronicky pomocou ovládacieho panelu, či dokonca s použitím počítača na zápis a vyhodnotenie potrebných údajov.

Podstavec pre uchytienie vzoriek

Dôležitú úlohu aparatury zohráva takisto podstavec (obrázok 1-7) skonštruovaný buď z hliníka alebo z oceli. Slúži pre umiestnenie a prichytenie skúšobných vzoriek či už z kompozitných, kovových, nekovových materiálov, alebo aj plastov. Hlavnými prvkami sú:

- základňa podstavca s minimálnymi doporučenými rozmermi 300×300 mm
- výrez pod vzorkou v tvare obdĺžnika 75 ± 1 mm a 125 ± 1 mm s minimálnou hĺbkou 6 mm
- svorková príchytka. Minimálna prítlačná sila by mala byť 1100 N dokopy pre všetky štyri príchytky. Vzďialenosť špičky príchytky od okraja vzorky by mala byť 25 mm.
- špička príchytky z neoprénovej gumy pre bezpečné zovretie vzorky do podstavca
- vodiace kolíky, ktoré slúžia pre vycentrovanie vzorky cez výrez na stred



Obr. 1-7 Podstavec so svorkovými príchytkami [3]

Impaktor

Závažie s impaktorom by malo mať hmotnosť $5,5 \pm 0,25$ kg, malo by byť ukončené hladkou pologuľatou špičkou s priemerom $16 \pm 0,1$ mm a s tvrdosťou približne 60 až 62 HRC⁴. Všeobecne platí, že čím bude väčší priemer koncového hrotu, tým bude rozsiahlejšia aj kontaktná oblasť poškodenia skúšobnej laminátovej vzorky.

Poznámka: ak sa nedosiahne požadovaná energia nárazu impaktora z výšky najmenej 300 mm, smie sa použiť závažie s nižšou váhou, a síce $2 \pm 0,25$ kg. [2]

1.2.2 Sériovo vyrábané padostroje

Súčasný trh ponúka široké portfólio komerčných padostrojov pre rázové skúšky s nízkymi, strednými i vysokými dopadovými energiami a rýchlosťami. V Európe sa týmito prístrojmi zaoberajú napríklad firmy Imatek, Zwick Roell, Coesfeld, Instron atď. V Českej republike je to spoločnosť LaborTech, ktorá sa špecializuje na výrobu skúšobnej techniky i automatov a pôsobí vo svojom odvetví od roku 1995.

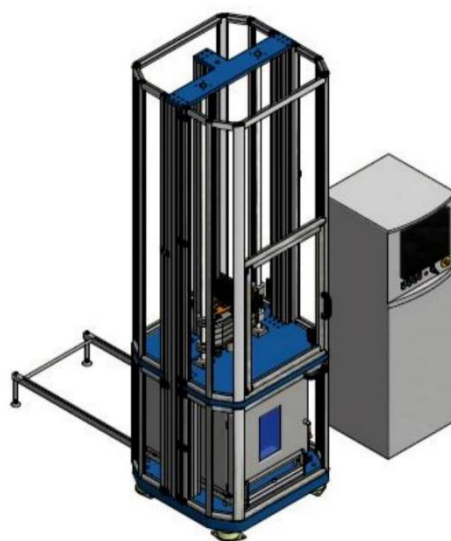
LaborTech DPFest 400

Nízkokapacitné padostroje rady DP od spoločnosti LaborTech sú primárne určené k vykonávaniu skúšok súčastí s rozmanitými tvarmi a materiálmi v širokom spektre nízkych a stredných energií. Už aj najmenšia jednotka označená DPFest 400 môže disponovať uzatvorenou teplotnou komorou pre vzorky. Užívateľ si v tomto priestore môže ľubovoľne zvoliť teplotu v rozmedzí od -196 °C až do 400 °C, počas ktorej bude uskutočnený dopad závažia na teleso. [7] Stroje LaborTech sa vyznačujú i inými prednosťami, a to napríklad:

- rámom s vysokou tuhosťou, životnosťou a bezúdržbovou prevádzkou
- modulárnym usporiadaním s možnosťou doplnenia ďalšieho príslušenstva od LaborTechu
- obslužným panelom s LCD monitorom a intuitívnym softwarom DropTest
- automatickým a rýchlym nastavením priečniku so závažím na definovanú výšku zdvihu s presnosťou $0,01$ mm
- špeciálnymi tlmičmi pohlcujúcimi nárazovú energiu
- podporou noriem ČSN, DIN, EN, ISO, ASTM, GOST

Tab. 1-1 Základné technické údaje stroja DPFest 400 [7]

Hlavné parametre	Hodnota	Jednotka
Rýchlosť nárazu	0,77 – 4,7	m/s
Dopadová energia	0,3 – 415	J
Rozsah hmotnosti závažia	0,5 – 37,5	kg
Rozsah výšky pádu	0,03 – 1,15	m
<i>Rozmery zariadenia</i>		
Výška	2620	mm
Šírka	800	mm
Hĺbka	570	mm
Hmotnosť	345	kg



Obr. 1-8 LaborTech rada DPFest do 3000 J [7]

⁴ Tvrdosť špecifikovaná normou ASTM E18 – Skúšobné metódy tvrdosti podľa Rockwella pre kovové materiály

Zwick Roell HIT230F

Nemecká spoločnosť Zwick Roell AG založená už v roku 1920 ako Roell & Korthaus, vyvíja inštrumentované padostroje rady HIT230F špeciálne pre potreby leteckého priemyslu. Prístroj tak je optimálne zhotovený na testovanie vopred upravených panelov z vláknových kompozitov pre štandardné skúšky CAI⁵ [1, 8]. Podľa oficiálnych správ výrobcu stroj vyniká predovšetkým v efektívnosti a prevádzkovateľnosti. Ponúka aj ďalšie výhody a funkcie, akými sú napríklad:

- bezpečné, nenáročné a spoľahlivé ovládanie
- dobrá dostupnosť k testovaciemu priestoru
- jednoduché zmeny príslušenstva
- zariadenie proti odrazu, ktoré zabráňuje opätovnému nárazu impaktoru na vzorku
- presné a bezproblémové nastavenie dopadovej energie pomocou počítača

Tab. 1-2 Základné technické údaje stroja HIT230F [8]

Hlavné parametre	Hodnota	Jednotka
Maximálna rýchlosť nárazu	4,4	m/s
Maximálna energia	100	J
Rozsah hmotnosti závažia	2,04 – 10,2	kg
Rozsah výšky pádu	0,11 – 1,0	m
Rozmery zariadenia		
Výška	2600	mm
Šírka	1235	mm
Hĺbka	695	mm
Hmotnosť	400	kg



Obr. 1-9 Zwick Roell HIT230F [8]

Instron CEAST 9340

Americká firma Instron pôsobí v testovacom priemyselnom odvetví od roku 1946 a svoje bohaté skúsenosti už dlho uplatňuje na vývoj a výrobu skúšobných zariadení. Padostroj CEAST 9340 sa stal jednoznačným adeptom na meranie a vyhodnocovanie poškodenia kompozitných materiálov. Tento aparát má veľmi podobné technické vlastnosti ako LaborTech PDFest 400, takisto jeho kompatibilita zahŕňa normy ako ASTM D7136, Airbus AITM 1-0010, Boeing 7260, SACMA SRM 2R-94 a mnoho iných. Odlišnosti by sa v porovnaní s predchádzajúcimi zariadeniami určite našli v použitom programe CEAST impact software [9], ktorý zapisuje dáta o jednotlivých experimentoch.

Poznámka: firmy Imatek, Coesfeld a iné ponúkajú takisto kvalitné padostroje s malými i veľkými dopadovými energiami a rýchlosťami. Ich kľúčové vlastnosti a technické špecifikácie nadobúdajú obdobný charakter, ako tie vyššie uvedené, a preto nemá zmysel ich všetky detailne popisovať.

⁵ Compression After Impact – Stlačenie po náraze. Súvisiace normy: Airbus AITM 1-0010, Boeing 7260, ISO 18352, DIN 65561, ASTM D7136, EN 6038. [1, 8]

Tab. 1-3 Základné technické údaje stroja CEAST 9340 [9]

Hlavné parametre	Hodnota	Jednotka
Rýchlosť nárazu	0,77 – 4,65	m/s
Dopadová energia	0,3 – 405	J
Rozsah hmotnosti závažia	1,0 – 37,5	kg
Rozsah výšky pádu	0,03 – 1,1	m
<i>Rozmery zariadenia</i>		
Výška	2620	mm
Šírka	985	mm
Hĺbka	610	mm
Hmotnosť	340	kg



Obr. 1-10 Instron CEAST 9340 [9]

1.2.3 Zariadenia pre ohybové skúšky

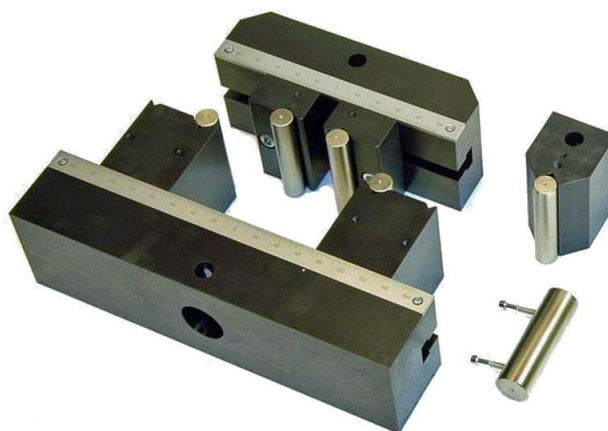
Skúšobné prístroje podliehajú štandardom ISO 5893. Medzi základnými požiadavkami kladenými na zariadenia sa nachádza napríklad schopnosť stroja dodržiavať určitú rýchlosť zaťažovania predpísanú tabuľkou 1-4. Ďalším dôležitým aspektom sú polomery valcových zaťažovacích hrotov a podpier – ich presné údaje figurujú v podkapitole 1.1.2.

V segmente ohýbacích aparátov je výber ešte väčší, ako pri samotných padostrojoch, a možno tu použiť univerzálne viacúčelové mechanizmy. Vyrábajú ich už spomínané firmy Instron, Zwick Roell, LaborTech, ale i iné značky s veľkým menom ako napríklad echoLAB, Admet, Test-Resources a mnoho ďalších.

V zásade ide o to, aby sa dosiahla požadovaná rýchlosť zaťažovania a schopnosť uchytiť potrebný prípravok pre troj a štvorbodový ohyb podľa normy ASTM D7264⁶ – vhodný reprezentant nesie označenie GD7264-22 a je znázornený na obrázku 1-11.

Tab. 1-4 Doporučené hodnoty rýchlosti zaťažovania [5]

Rýchlosť [mm/min]	Tolerancia [%]
0,5	±20
1	±20
2	±20
5	±20
10	±20
20	±10
50	±10
100	±10
200	±10
500	±10



Obr. 1-11 Prípravok GD7264-22 vhodný pre ohybové skúšky [11]

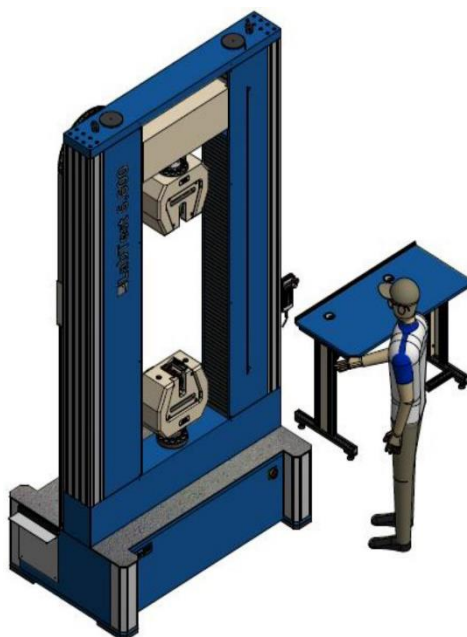
⁶ Štandardná metóda pre ohybové vlastnosti kompozitových materiálov s polymérovou maticou

Laboratórium Leteckého ústavu disponuje jedným všestranným elektromechanickým skúšobným strojom LabTest 6.500SP1-VM, vďaka ktorému sa uskutočnili experimentálne merania zamerané na ohybové testy pre potreby tejto práce. Toto zariadenie (viď obrázok 1-12) je takisto určené pre namáhanie vzoriek i celých výrobkov na ťah alebo tlak [12]. Ponúka modulárne usporiadanie s možnosťou doplnenia rozličného príslušenstva od firmy LaborTech (prieťahomery, teplotné komory, sondy...) a prináša určité výhody:

- robustný rám s vysokou tuhosťou, životnosťou a odolnosťou proti vibráciám
- dve guľôčkové skrutky s predpäťm a lineárnym vedením
- AC servoriadenie s nulovou hlučnosťou
- diaľkové ovládanie prístroja bez použitia počítača
- software integrovaný aj v diaľkovom ovládači RMC 7 s LCD displejom a stop tlačidlom
- ergonómia pracovného priestoru, bezproblémová manipulácia

Tab. 1-5 Základné technické údaje stroja LabTest 6.500 [12]

Hlavné parametre	Hodnota	Jednotka
Menovité zaťaženie ťah/tlak	500	kN
Minimálna rýchlosť	0,0001	mm/min
Maximálna rýchlosť	350	mm/min
Tuhosť rámu bez tenzometru	800	kN/mm
Tuhosť rámu s príslušenstvom	420	kN/mm
Rozmery zariadenia		
Výška	2790	mm
Šírka	1713	mm
Hĺbka	1050	mm
Hmotnosť bez príslušenstva	2980	kg
Hmotnosť s príslušenstvom	3340	kg



Obr. 1-12 LabTest 6.500 [12]

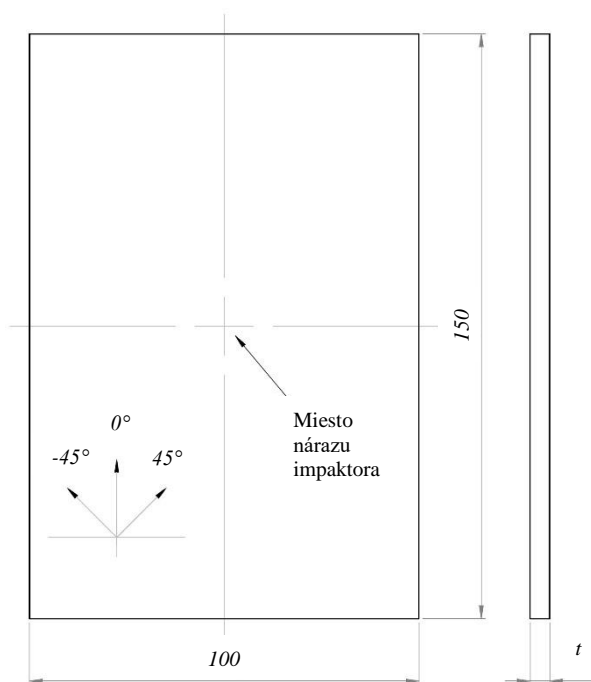
1.2.4 Doporučené vzorky z kompozitných materiálov

Vo vedeckých prácach [10, 13, 14, 22] sa objavujú predovšetkým sklenené, uhlíkové a hybridné laminátové vzorky zhotovené prevažne podľa normy ASTM D7136. Ich rozmery s lineárnymi toleranciami $\pm 0,25$ mm ilustruje obrázok 1-11, ale tieto hodnoty bývajú občas pozmenené z rôznych príčin (príkladom môže byť použitie atypického podstavca na uchytenie vzoriek). Takže zväčša sú preferované obdĺžnikové tvary, výnimočne sa vyskytujú i štvorcové s rozmermi 100×100 mm. Akceptovateľná drsnosť povrchu na všetkých okrajoch je $R_a = 3,2$.

Najdôležitejšiu úlohu zohráva hrúbka skúšobného telesa, ktorá by sa mala pohybovať v rozmedzí 4 až 6 mm, ideálne čo najbližšie k 5 mm. Počet vrstiev nie je presne vymedzený, avšak pri jedno-smerných páskach by mala orientácia vlákien pokladaných na seba predstavovať uvedené zloženie $[45/0/-45/90]_{NS}$, pričom N je celé číslo a označuje počet vrstiev v danom lamináte. Ak sa jedná o tkaniny, usporiadanie je nasledovné $[(45/-45)/(0/90)]_{NS}$. Termín $(45/-45)$ reprezentuje jednovrstvovú tkaninu s vláknami orientovanými v určitých uhloch, to isté platí aj pre označenie $(0/90)$. V prípade, že je hrúbka skúšobnej vzorky tenšia ako 4 mm, uvažuje sa s celým číslom $N + 1$. [2]

Tabuľka A v prílohe A znázorňuje a porovnáva zopár vedeckých prác zameraných na chovanie rozličných kompozitových materiálov po dopadových experimentoch. Výsledkom pozorovania je

finálny druh poškodenia danej vzorky, pričom zásadnú úlohu zohrávajú faktory ako hrúbka telesa (respektíve počet vrstiev), nárazová energia, či rýchlosť padajúceho závažia tesne nad povrchom.



Obr. 1-13 Optimálne rozmery skúšobnej vzorky [2]

Poznámka: pri obdĺžnikovom tvare telesa je 0° orientácia vlákien, teda osnova, vždy rovnobežná s pozdĺžnym, čiže najdlhším rozmerom.

1.3 Nedeštruktívna kontrola vnútorného poškodenia

K hodnoteniu dynamického poškodenia kompozitnej konštrukcie, nielen v leteckom priemysle, slúži niekoľko užitočných metód, ktoré našli uplatnenie spravidla v oblasti kontroly kvality a spoľahlivosti výrobkov. Tieto uvedené metódy podliehajú nedeštruktívnym skúškam, ktoré by sa dali definovať ako proces testovania, zisťovania a vyhodnocovania nepravidelností a odchýlok v materiálových charakteristikách, eventuálne bez ovplyvnenia schopnosti prevádzky daného dielu. Pri nedeštruktívnom testovaní vo všeobecnosti platí, že po dokončení kontroly môže byť súčiastka či zostava naďalej používaná. [16]

Aplikovateľných spôsobov NDT⁷ je v dnešnej dobe pomere dosť už i pre kompozitné materiály. Jedná sa hlavne o metódu: impedančnú, rezonančnú, vizuálnu, kapilárnu, poklepom, prežiarením, ultrazvukom, termovíziou, akustickej emisie, či holografickej interferencie. Správny výber a použiteľnosť týchto techník závisí na type a veľkosti hľadaného defektu.

1.3.1 Vizuálna metóda

Medzi najstaršie inšpekčné spôsoby, ako overiť spracovanie daného produktu, sa radí vizuálna kontrola – možno ňou pozorovať len povrch materiálu pomocou zraku, prípadne lupou, či mikroskopom (priama metóda). Uzatvorené konštrukčné priestory by sa dali dôkladne prezrieť prostredníctvom endoskopu, respektíve boroskopu (nepriama metóda). Informácie o povrchových vadách

⁷ Non-destructive testing – Nedeštruktívne skúšky

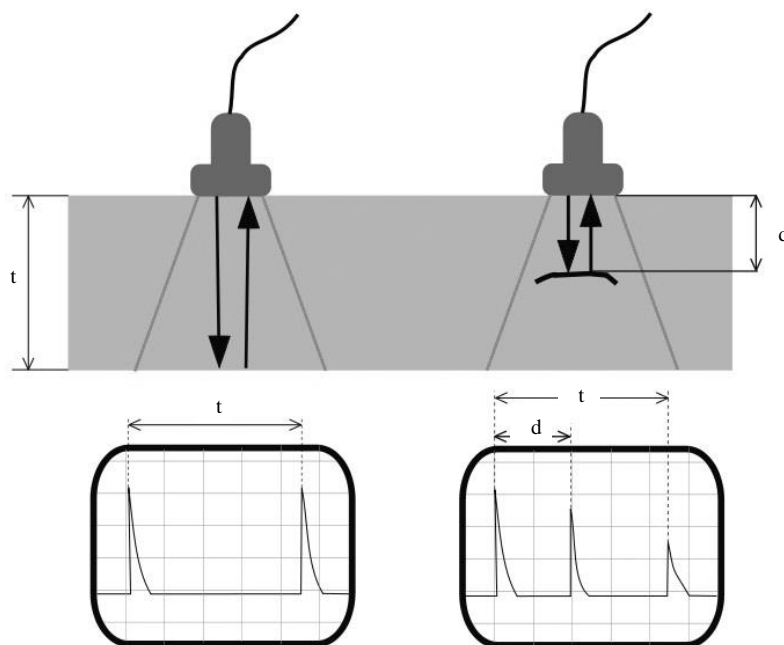
(trhlinách, prasklinách...) bývajú jednoducho identifikovateľné, v prípade transparentnosti kompozitov možno sledovať i vnútorné vady, napríklad dutiny⁸.

Táto technika je spolu s metódou poklepom (tapping) najlačnejšia, niekedy časovo náročnejšia, no častokrát býva najviac podceňovaná.

1.3.2 Ultrazvuková metóda

Vhodnou a najrozšírenejšou metódou k odhaleniu najmä delaminácie, dutín, miest bez výstuže, býva detekcia ultrazvukom. Základný princíp vychádza z vysielania ultrazvukových vln (s krátkym impulzom so stredovou frekvenciou v rozsahu od 0,1 až do 20 MHz) a následným pozorovaním odrazenej odozvy. Energia z ultrazvuku sa do materiálu vpúšťa pomocou vysielача (sondy), ktorý je v blízkom kontakte s povrchom testovanej vzorky. Hlavnou časťou sondy je piezoelektrická doštička, ktorá premieňa elektrickú energiu na mechanickú v podobe zvukových impulzov vysielaných do materiálu. [17, 18] Metóda má dlhú históriu a široké spektrum využitia obzvlášť pri kovoch, ale v súčasnosti našla svoje uplatnenie i pri laminátoch. Rozdeľuje sa na dva hlavné typy, a to:

- technika odrazová
 - využíva odraz ultrazvukových vln od defektu (viď obrázok 1-14)
 - vyžaduje prístup k materiálu len z jednej strany
- technika priechodová
 - využíva vysielaciu sondu a prijímací senzor na sledovanie odozvy s prípadným poklesom amplitúdy
 - vyžaduje prístup k materiálu z oboch strán



Obr. 1-14 Základný princíp ultrazvukovej odrazovej metódy [16]

Obrázok 1-14 popisuje podstatu funkcie odrazového ultrazvuku. Vľavo na schéme sa nachádza skúmaný objekt s hrúbkou t bez vady, čiže vyžiarená a odrazená vlna by mali predstavovať práve túto hrúbku. Na osciloskope sú jednotlivé výchylky amplitúdy medzi sebou rovnako veľké a dosahujú približne identickú veľkosť. Vpravo na schéme reprezentuje výskyt defektu vzdialenosť

⁸ Dutiny reprezentujú priestor s uzatvoreným vzduchom alebo iným plynom. Vytvorí sa zväčša už pri výrobe nedostatočným zlisovaním a vytvarovaním vrstiev výstuže pred samotným vytvrdzovaním.

od povrchu vzorky hodnota d . Časť vyžiarenej vlny sa odrazí od vady a zvyšná časť energie putuje až na opačnú stranu telesa, kde sa odrazí naspäť do sondy. V tomto prípade sa na oscilátore objaví viacero vln s rozdielnymi amplitúdami.

Medzi významné prednosti ultrazvukovej defektoskopie patrí predovšetkým vysoká citlivosť, presnosť a penetračná schopnosť s okamžitým vyobrazením výsledkov, a možnosť automatizácie vďaka rôznym špeciálnym manipulátorom. Na druhej strane táto metóda vyžaduje obsluhu skúseným personálom, ďalej zabezpečenie čistého a hladkého povrchu skúšobného telesa, alebo nutnosť použiť väzbové prostredie (určitý druh gélu) medzi sondou a povrchom vzorky z dôvodu nepresných výsledkov kvôli vzduchovej vrstve. Na základe dôležitej požiadavky školeného personálu sa rozhodlo, že namiesto ultrazvukovej analýzy sa v rámci nedeštruktívneho vyhodnocovania diplomová práca zamerala skôr na termovíziu metódu, ktorej hlavná podstata je popísaná v podkapitole 1.3.3.

1.3.3 Termovízna metóda

Táto technika patrí jednoznačne medzi bezdotykové tepelné metódy, ktoré využívajú plošný detektor (termokameru) pre identifikáciu infračerveného žiarenia. V zásade ide o to, že teplotné rozloženie na povrchu sa meria opticky cez vyžiarené spektrum infračervenej emisie. Defekty (trhliny, delaminácia, odlepenie, dutiny a iné) sa prejavujú tým, že pri prechode energetického stimulu skúmaným objektom sa nad miestom vady zmení teplotné rozhranie, čo ovplyvní vlastnosti samotného materiálu. Za určitých podmienok a s vhodným vybavením možno transformovať radiometrické žiarenie pomocou IR⁹ kamery priamo na hodnoty teploty. [19]

Termovíziu možno klasifikovať do dvoch základných skupín:

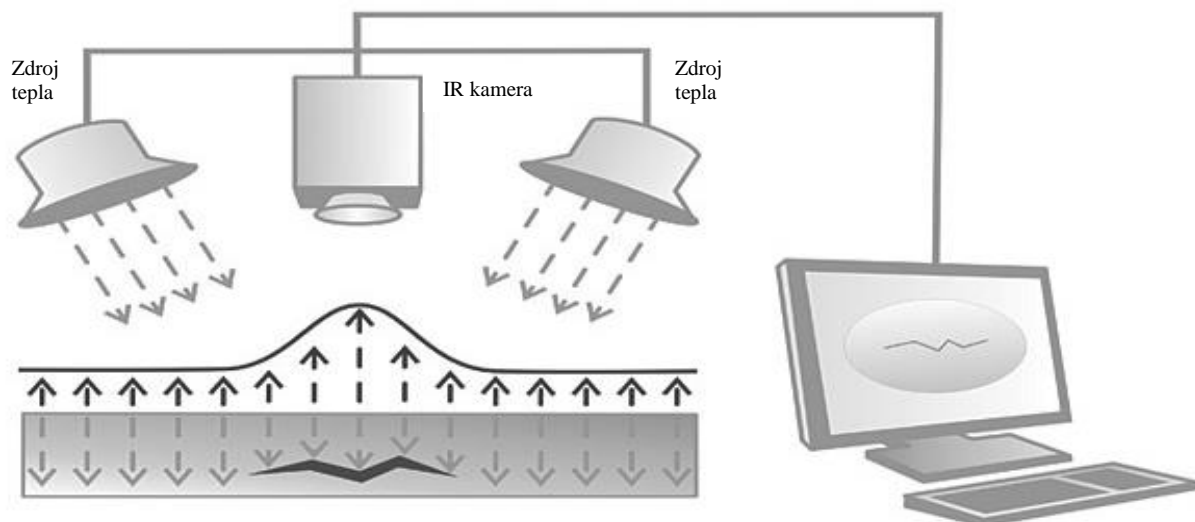
- **aktívna IR** – zdroj tepla predstavuje externá výbojka, ktorá pomocou určitého energetického stimulu ožiari skúmaný materiál a vyobrazí tepelný kontrast
- **pasívna IR** – zdrojom tepla býva samotné skúmané teleso, ktoré vyvíja teplo, takže má rozdielnu teplotu od okolitého prostredia (spravidla vyššiu)

V rámci nedeštruktívnych skúšok kompozitov sa vhodnou voľbou javí prirodzene aktívna metóda, ktorá je ešte ďalej rozčlenená na impulznú termovíziu, techniku postupného ohrevu, synchroni-zovanú termovíziu, ultrazvukovú termovíziu a vibrotermovíziu.

Podstata impulznej termovízie spočíva v extrémne rýchlom ohreve telesa (v rádoch jednotiek milisekúnd pri kovoch, alebo málo sekúnd pri plastoch či kompozitoch) vyslaním veľmi krátkého energetického impulzu a následným analyzovaním teplotného rozhrania procesu chladnutia termokamerovým systémom. Ako vhodný zdroj impulzov (tepla) môže byť použitá záblesková (flash) lampa, halogénová lampa, laserový ohrev, vírivé prúdy... Prednosti tejto metódy kladú dôraz na okamžité výsledky analýz, schopnosť určiť hĺbku defektov, mapovať hrúbku povrchových náterov a povlakov a popri prípade celý systém automatizovať. Naopak nedostatky zase utkvievajú v obmedzenej hĺbke celej analýzy, vo vplyve okolitého prostredia, alebo v obmedzení plochy telesa s ohľadom na reálne výkony budiacich lúčov. [20, 21]

Obrázok 1-15 zobrazuje základnú schému a princíp funkcie impulznej techniky. Záblesková lampa vyšle impulz na skúmaný objekt, jeho teplota náhle stúpne, energetická vlna sa šíri ďalej do hĺbky telesa a teplota povrchu začne prirodzene klesať. Ak sa v objekte vyskytne vada, v jej mieste bude prechod energie značne spomalený. Vo výsledku sa na povrchu materiálu naakumuluje vyššie množstvo tepla, ktoré infračervená kamera vyhodnotí ako miesta so zníženým kontrastom. Jav je pekne odlišený farebným spektrom v pracovnom prostredí počítača. Výsledok na LCD displeji z obrázku 1-15 má iba ilustratívny charakter, v skutočnosti sa tam ukáže testovaný objekt s rozličným sfarbením a farebnou stupnicou.

⁹ Infrared radiation – Infračervené žiarenie



Obr. 1-15 Podstata aktívnej IR termovízie [20]

Impulznou odrazovou termovíziou nedeštruktívneho charakteru sú v práci vykonané adekvátne merania na vyhodnotenie teplotných nehomogenít v materiály, respektíve poškodených oblastí (trhliny, delaminácia atď.) po rázových skúškach na kompozitových vzorkách. Na tieto účely poslúžila termokamera zapožičaná Energetickým ústavom FSI v Brne. Jednalo sa o termokameru značky FLIR SC660 od spoločnosti FLIR Systems (obrázok 1-16 reprezentuje bočný pohľad na kameru a základné technické parametre sú uvedené v tabuľke 1-6).



Obr. 1-16 Termokamera FLIR SC660

Termokamera FLIR SC660 je vysokovýkonný infračervený systém slúžiaci pre vedu a výskumné aplikácie pre spektrum s dlhými vlnovými dĺžkami. Disponuje výklopným 5,6 palcovým LCD displejom s rozlíšením 1024×600 pixelov. Na prenos obrazu do počítača v reálnom čase slúži port FireWire alebo USB-mini, ktoré sa využívajú aj na účely analýzy radiometrických údajov a vytvárania aktuálnych snímok. Fotoaparát je vybavený štandardným objektívom s 24° šošovkou a umožňuje 1 až 8 násobné digitálne priblíženie. Laserové ukazovadlo umiestnené nad objektívom zase napomáha priradiť horúce či studené miesto do IR obrazu so skutočným fyzikálnym cieľom v zornom poli. Zariadenie takisto obsahuje batériu, ktorá dodáva elektrickú energiu až tri hodiny aj na externých miestach, kde sa nenachádza zdroj napájania. [26]

Tab. 1-6 Základné technické údaje FLIR SC660 [26]

<i>Hlavné parametre</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
IR rozlíšenie	640 × 480	<i>pixelov</i>
Zorné pole	24 × 18	<i>deg</i>
Digitálny fotoaparát	3,2	<i>Mpx</i>
Min. vzdialenosť zaostrenia	0,3	<i>m</i>
Frekvencia obrázkov	30	<i>Hz</i>
Teplotná citlivosť	<30	<i>mK</i>
Presnosť	±1	<i>%</i>
Rozsah snímaných teplôt	-40 do +1500	<i>°C</i>
<i>Rozmery zariadenia</i>		
Dĺžka	299	<i>mm</i>
Šírka	144	<i>mm</i>
Výška	147	<i>mm</i>
Hmotnosť	1,8	<i>kg</i>

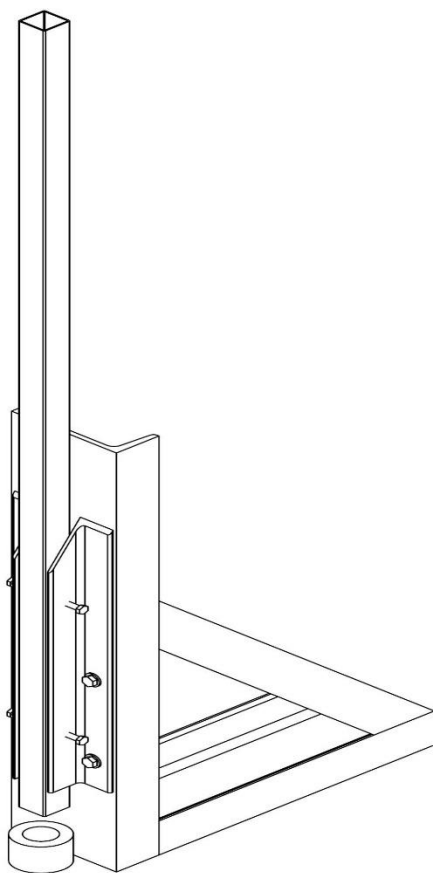
2 NÁVRH ZARIADENIA A VZORIEK

Konštrukčný návrh skúšobného prípravku bol čiastočne inšpirovaný normou ASTM D7136 tak, aby spĺňal hlavnú podstatu dopadových experimentov. Naopak námet na presné rozmery vzoriek bol čerpaný z vedeckých prác venujúcich sa tematike rázových testov. Takmer všetky tieto práce rozoberali metodiku, podmienky a vyhodnocovanie samotných skúšok, nie však návrh samotného prístroja (používal sa najčastejšie komerčný typ, zakúpený od rôznych značiek).

2.1 Konštrukčný návrh zariadenia

Návrh padostroja prebiehal v skúšobnej hale Leteckého ústavu za pomoci vedúceho diplomovej práce. Na výrobu zariadenia bola použitá konštrukčná oceľ s označením S235JR. Aparát sa skladá celkovo zo siedmich hlavných súčastí a spojovacieho materiálu, pričom základ rámu tvoria tri hlavné U profily navzájom pozvárané. K U profilom sú fixne priskrutkované dva uholníky, na tie sa pripevní vodiaca trubka pomocou dvoch skrutiek na dvoch stranách (na ľavej a pravej strane). Medzi uholníkmi je určitá vôľa, aby sa nastavila presná poloha vodiacej trubky vo vertikálnej rovine presne kolmo k zemi. Na záver sa len k zariadeniu voľne priložil valcový podstavec, ktorý sa oprel o rám padostroja a umiestnil sa presne na stred pod vodiacu trubku.

Hmotnosť prístroja sa pohybuje na hranici štyridsaťdva kíl bez dopadového prípravku. K vizualizácii padostroja (viď obrázok 2-1) poslužil CAD program SolidWorks 2017 od firmy Dassault Systemes – výkresová dokumentácia všetkých zhotovených súčastí, zostáv a kusovníkov je priložená do elektronickej prílohy k tejto práci (zoznam dokumentácie je uvedený v prílohe B). Pre ľahšiu predstavu veľkosti aparátu slúži príloha C, ktorá reprezentuje dva primárne pohľady s udaním základných rozmerov. Obrázok 2-2 znázorňuje reálnu fotku skonštruovaného zariadenia, ktorý sa nachádza na skúšobni C2 217 Leteckého ústavu FSI.



Obr. 2-1 Model padostroja z CAD programu



Obr. 2-2 Skonštruovaný padostroj

Poznámka: v prípade použitia navrhnutého padostroja na ďalšie experimentálne účely je možné voliť požadované nárazové energie v rozsahu od 1 J do 33 J. Uvedené hodnoty platia pri použití zvoleného dopadového závažia s impaktorom popísaného v podkapitole 2.1.1. Nie je však vylúčené, že výmenou uvedeného závažia za ťažšie sa môže hodnota maximálnej dopadovej energie ešte o niečo málo navýšiť.

2.1.1 Návrh impaktora

Valcové závažie bolo navrhnuté a skonštruované v súlade s vodiacou trúbkou padostroja tak, aby bol pohyb vo vertikálnej rovine prirodzený, bez nejakých zásekov a so zanedbateľným trením. Impaktor bol implementovaný do závažia pomocou závitú, čiže je možné použiť odlišné koncové hroty k simulácii rôznych veľkostí cudzích dopadajúcich telies a zároveň aj k porovnaniu rozsahu oblastí výsledného poškodenia na vzorkách pri viacerých typoch a tvaroch impaktora. Na základe predĺženej tyče s malým priemerom, priskrutkovanej do závažia, a s pomocou posuvníka sa ľahko prispôbi potrebná výška k vyvodu požadovanej energie. Manipulácia je tak nenáročná a ľahko ju zvládne iba jeden človek.

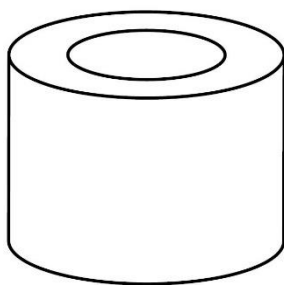
Hmotnosť celého dopadového telesa (viď obrázok 2-3) sa stanovila na rovných $m = 2,6$ kg. Celková dĺžka tohto prípravku činila niečo málo cez 1600 mm. Na impaktor bol použitý pologuľatý koncový hrot s polomerom $R = 6$ mm. Takisto náležitá výkresová dokumentácia je pripojená v elektronickej prílohe.



Obr. 2-3 Model závažia s impaktorom a tyčou s posuvníkom z CAD programu

2.1.2 Podstavec

Namiesto sofistikovaného podstavca so svorkovými príchytkami popísaného v podkapitole 1.2.1 bol za adekvátnu náhradu zvolený klasický dutý valec s vonkajším priemerom $d_1 = 70$ mm a vnútorným priemerom $d_2 = 40$ mm. Námet na tento jednoduchý tvar bol inšpirovaný vedeckou prácou [10]. Hmotnosť valcového podstavca činila $m = 1,01$ kg.



Obr. 2-4 Model podstavca z CAD programu

2.2 Skúšobné vzorky

Na výrobu vzoriek boli použité predimpregnované lamináty s dvomi typmi vlákien – uhlík a sklo (ich základné parametre sa nachádzajú v tabuľke 2.1). Zároveň ich kombináciou vznikol hybridný druh vzoriek, ktorý niesol vlastnosti oboch použitých materiálov. Uhlík sa vyznačuje vysokou pevnosťou, tuhosťou a nízkou mernou hmotnosťou, sklo zase nižšou cenou, nízkou tepelnou rozťažnosťou a hlavne vyššou húževnatosťou oproti uhlíku. Vlákna v prepregu boli orientované v dvoch primárnych smeroch (0° osnova a 90° útok) a boli potiahnuté termosetickou epoxidovou

živickou, ktorá tvorila polymérovú matricu. Počet vrstiev tkanín pri všetkých vzorkách sa stanovil na šesťnásť, aby sa dosiahla rovnaká požadovaná hrúbka.

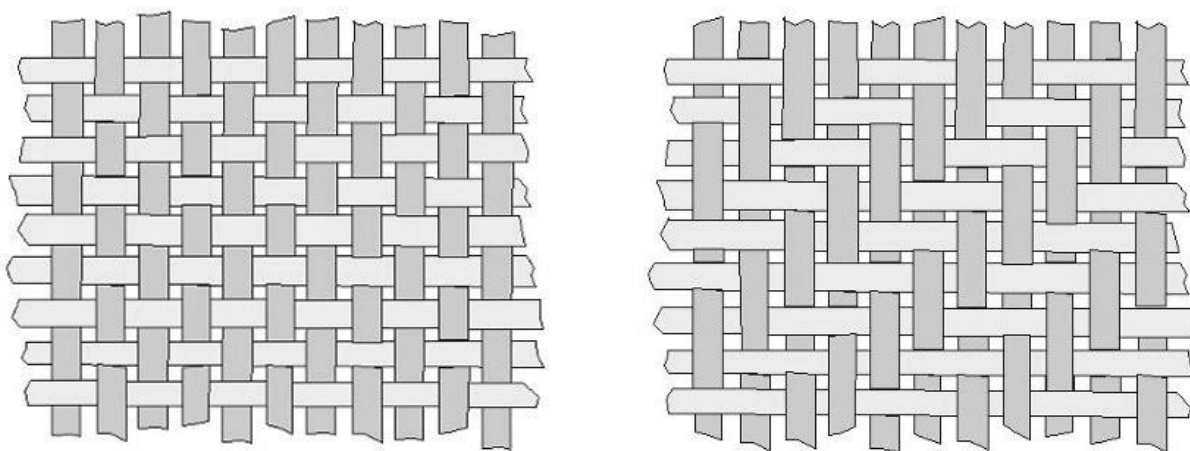
Sklenený prepreg s epoxidovou matricou bol prehľadne označený na ochrannnej fólii, preto sa jeho materiálové vlastnosti jednoducho dohľadali v dátových brožúrach na stránkach výrobcu. Uhlíkový prepreg s epoxidovou matricou nemal na sebe žiadny konkrétny atribút, preto bol jeho malý výrez zmeraný a zvážený na mikrováhe s presnosťou na desaťtisícinu gramu. Na základe toho sa stanovila približná gramáž a keďže sa jednalo o jedného predajcu, konkrétne o firmu Hexcel Holding GmbH (Rakúsko), tak sa presný typ kompozitu našiel opäť v katalógovom liste.

Hybridné kompozitné prepregy sa takisto skladali zo šesťnástich vrstiev. Na hornej a dolnej vonkajšej strane boli umiestnené štyri vrstvy tkaniny skleneného laminátu a jadro tvorilo osem vrstiev uhlíkového laminátu. Toto symetrické usporiadanie predstavuje súmerné rozloženie tkaním okolo geometrickej súradnicovej roviny.

Tab. 2-1 Použité typy laminátov [25]

Typ kompozitu	Štýl	Väzba	Gramáž [g/m ²]	Hrúbka vrstvy [mm]	Váhový pomer	
					Osnova	Útok
Uhlík	43 199	plátno	375	0,20	50	50
E sklo	1035	kepr 2×2	350	0,23	50	50

Označenie E sklo z tabuľky 2-1 zdôrazňuje použitie tohto typu laminátu prevažne na vetroňoch a na ľahkých lietadlách. Vyznačuje sa prívetivejšou cenou, ale horšími mechanickými vlastnosťami (malý modul pružnosti) oproti S sklu alebo D sklu. Vlastnosti tkaných materiálov sa odvíjajú aj od väzby, preto obrázok 2-5 ilustruje druhy väzieb použitých prepregov – väzba plátno bola aplikovaná pri uhlíku a sklenená tkanina pozostávala z väzby kepr 2×2.



Obr. 2-5 Typy väzieb kompozitných prepregov – plátno (vľavo) a kepr 2×2 (vpravo) [25]

2.2.1 Postup výroby a vytvrdzovania v prípravku

V prvom rade sa vzorky narezali na požadovaný rozmer podľa údajov pracovnej plochy tlakového zariadenia na vytvrdzovanie – na šírku 193 mm a na dĺžku 243 mm. Ďalej sa jednotlivé vrstvy tkanín začali skladať na tenký plech s uvedenými rozmermi, pokiaľ ich nebolo celkom šesťnásť. Na poslednú vrstvu sa položila odtrhávacia tkanina (viď obrázok 2-7), ktorá sa bezpečne strhla až po vytvrdnutí vzorky. Takže z jednej strany laminátovej vzorky, kde sa nachádzala odtrhávacia tkanina, bol povrch drsnejší, a na druhej strane zase hladší, keďže opačnú povrchovú vrstvu uzatváral spomínaný tenký plát plechu.

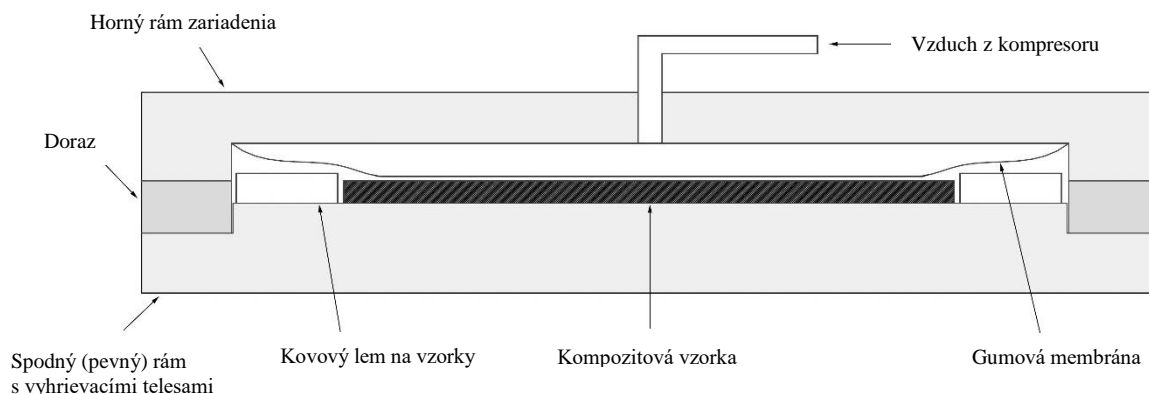


Obr. 2-6 Hybridný laminát po navrstvení tkanín



Obr. 2-7 Odtrhávacia fólia

Vytvrdzovanie kompozitových vzoriek prebiehalo v tlakovom zariadení so štyrmi vyhrievacími telesami typu OBS-45 s výrobným číslom 988908 od firmy TOS RAKOVNÍK (Česká republika), ktorého schému vyjadruje obrázok 2-8. Zistilo sa, že rám hornej dosky so silikónovou gumovou membránou nesprávne doliehal na spodný diel, preto musel byť upravený a navýšený o dorazy. Tie zaistili, že v zariadení by mohla byť umiestnená aj hrubšia vzorka na tenkom plechovom podklade. V prístroji sa ešte nachádzal kovový lem na vycentrovanie vzorky – kompetentné výkresy sú doložené v oboch typoch príloh. Tento lem bol do zostavy implementovaný prevažne z toho dôvodu, aby plnil funkciu ohraničenia vzorky – počas vytvrdzovania pri vysokej teplote má tlak pôsobiaci na povrch vzorky prostredníctvom pôsobenia gumovej membrány bielej farby tendenciu vytláčať tekutú ohriatu živicu hlavne z okrajových strán prepregu a tak sa nedosiahne rovnomerná hrúbka po dĺžke či šírke celej vzorky. Vložený kovový rám situáciu o niečo málo zlepšil, pretože na rozhraní lemu a vytvrdzovaného laminátu znížil rozdiel výšok povrchových vrstiev a zamedzil aj nadmernému unikaniu živice z vytvrdzovaného prepregu.



Obr. 2-8 Schéma prierezu tlakového prostriedku na vytvrdzovanie vzoriek

Samotný proces vytvrdzovania

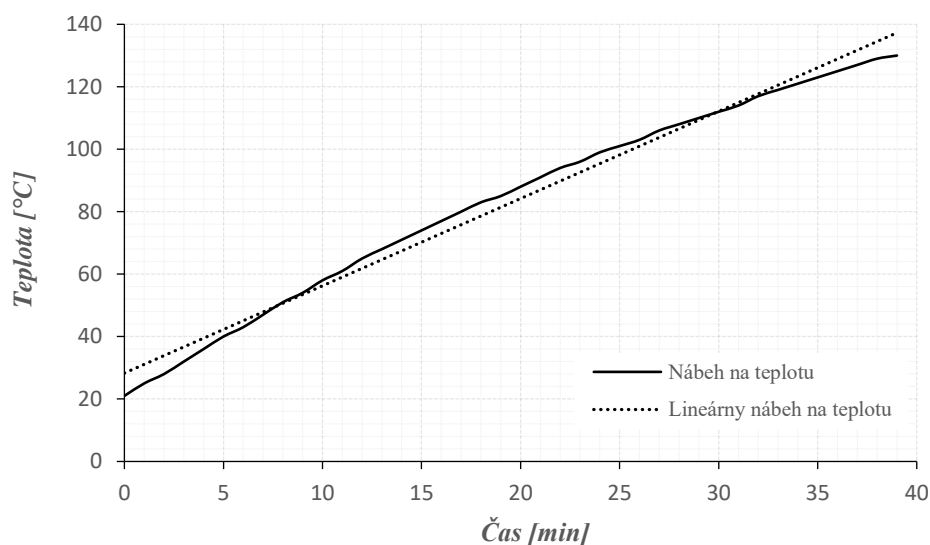
V prvom rade bolo nutné všetky časti tlakového prostriedku dôkladne očistiť a naseparovať, aby sa živica z prepregu nikam neprilepila a umožnila tak opätovné bezproblémové použitie zariadenia na vytvrdzovanie ďalších vzoriek. Na tento účel bol aplikovaný AXEL MOLD WIZ 2700 A prípravok. Potom už bolo zariadenie pripravené k použitiu.

Jeden pracovný cyklus vytvrdzovania zabral približne dve hodiny. Najprv sa uskutočnilo ohrievanie pracovného prípravku z teploty okolia až na požadované vytvrdzovanie, ktoré zabralo

zhruba štyridsať minút, potom prebiehala výdrž na teplote jednu hodinu a na záver nasledovalo pozvoľné ochladzovanie v uzatvorenej sústave asi dvadsať minút. Doporučené hodnoty teploty, tlaku a času vytvrdzovania boli zvolené podľa katalógového listu matrice a to nasledovne:

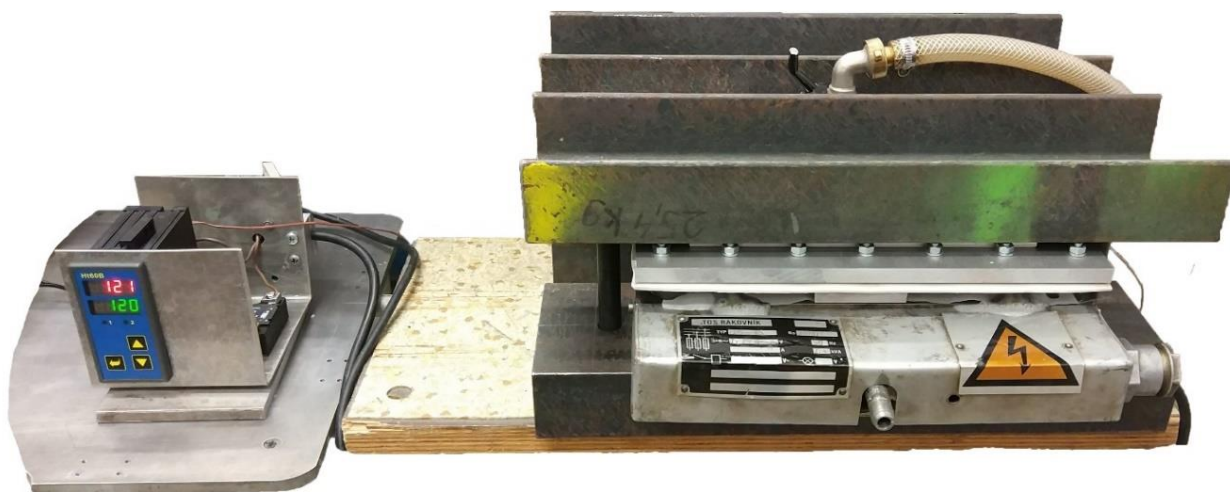
- uhlíkový prepreg – 120 °C / 1 hodina / 0,2 MPa
- sklenený prepreg – 130 °C / 1 hodina / 0,2 MPa
- hybridný prepreg – 130 °C / 1 hodina / 0,2 MPa

Nábeh a výdrž na teplote nastavoval a korigoval jednoduchý pid regulátor Ht60B s výrobným číslom 1713430 od firmy HTH8 s.r.o. (Česká republika). Obrázok 2-9 znázorňuje diagram nábehu na požadovanú teplotu vytvrdzovania, pričom ohrev o každý 1 °C naviac spočiatku trval len veľmi krátku dobu a ku koncu až skoro dvojnásobný čas. Vo výsledku by sa to dalo zhodnotiť tak, že pri ohrievaní kompozitových vzoriek sa teplota navýšila každú minútu približne o 3 °C.



Obr. 2-9 Diagram nábehu na teplotu vytvrdzovania

Potrebný tlak do sústavy dodával a zabezpečoval skrutkový kompresor Albert E50 s výrobným číslom 80011OTK vyrobený českou spoločnosťou ATMOS Systems a.s. Aparatúru na drevenom podklade s pid regulátorom na kovovom podklade zobrazuje obrázok 2-10.

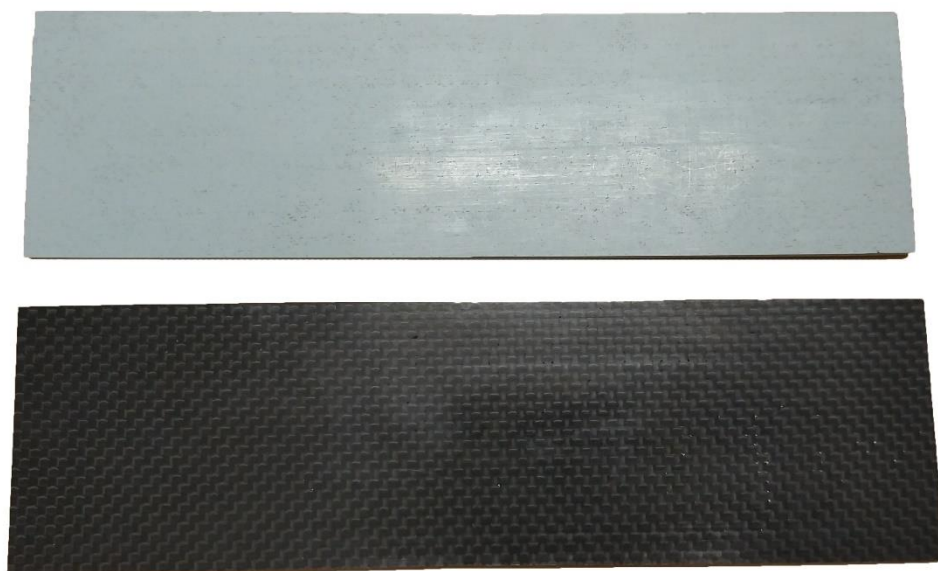


Obr. 2-10 Zariadenie s pid regulátorom teploty na vytvrdzovanie kompozitových vzoriek

Rezanie, dodatočné úpravy a finálne rozmery

Po vytvrdení a ochladnutí laminátových plátov s rozmermi 243 mm na dĺžku a 193 mm na šírku sa krajné hrany po obvode s nerovnomernou hrúbkou odrezali a neskôr aj zabrusili. Na narezanie vzoriek sa využila rezačka obkladov značky Zipper ZI-FS115 s výrobným číslom 12169 zado-
vážená firmou ZIPPER Maschninen GmbH (Rakúsko). Rezačka disponuje aj vodným chladením kotúča, ktoré však pri malých prestávkach nebolo nutné.

Z jedného vytvrdeného plátu nakoniec vznikli tri výsledné vzorky určené pre rázové skúšky. Po premeraní dosahovali rozmery 199 ± 2 mm na dĺžku a $55,5 \pm 0,5$ mm na šírku. Hrúbka sa stanovila na $3,8 \pm 0,1$ mm. Obrázok 2-11 ilustruje dva použité typy kompozitu, okrem hybridu.



Obr. 2-11 *Finálne vzorky po úprave rezačkou (sklo – hore; uhlík – dole)*

Na samotný záver finálnych úprav pred dopadovými testami sa vzorky zabrusili podľa potreby tak, aby dosahovali približne rovnaké rozmery, aby mali rovnobežné hrany a nemali hrboľaté okraje. K tomuto účelu poslúžila pásová brúska Proma BP – 150 s výrobným číslom 25702150 vyprodukovanú českou spoločnosťou PROMA CZ s.r.o.

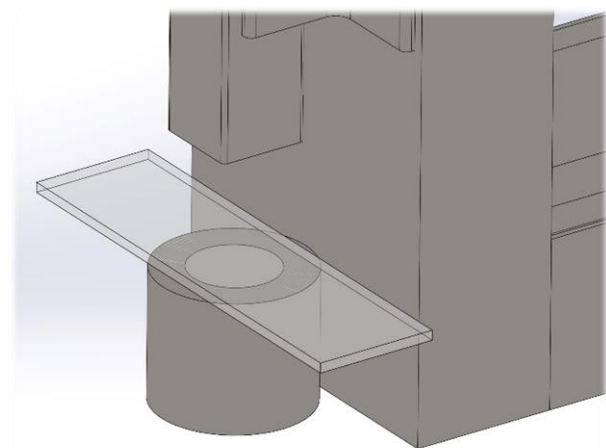
3 RÁZOVÉ SKÚŠKY

Rázové skúšky na navrhnutom a skonštruovanom padostroji prebiehali na skúšobni C2 217 FSI v Brne. Na obsluhu boli potrební dvaja ľudia, pričom jeden spúšťal dopadajúce závažie z vopred stanovenej výšky a druhý mal na starosť zabrániť opätovnému nárazu impaktoru na povrch kompozitovej vzorky. Úlohy boli rozdelené nasledovne: vedúci práce, pán doc. Klement, vykonával prvú spomenutú úlohu a autor práce zase tú druhú. Aby nedochádzalo k znovu narazeniu závažia, bol ihneď po odraze impaktoru vložený kúsok hliníkového plátu plechu na povrch vzorky. Hliníkový plech s hrúbkou jeden milimeter absorboval zvyšnú kontaktnú silu a nezapríčinil rozšírenie oblasti poškodenia ďalším dopadom.

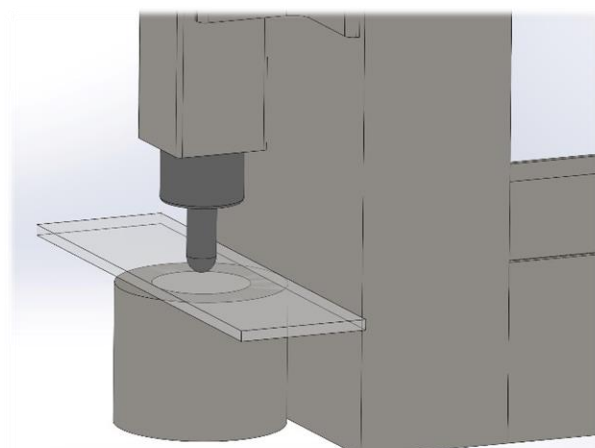
3.1 Priebeh experimentov

Priebeh experimentu mal charakter pozostávajúci z uvedených krokov:

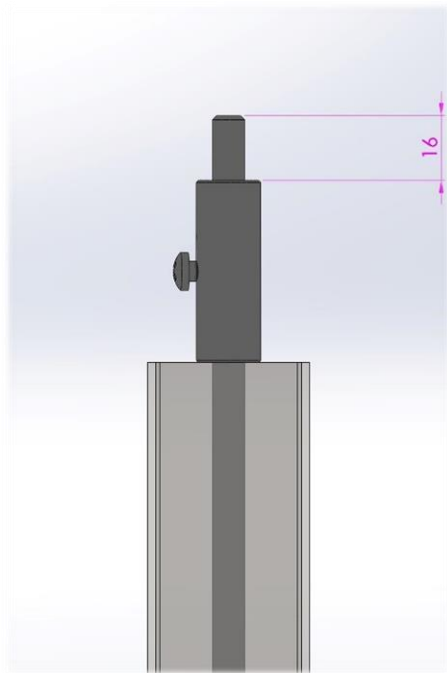
1. Na padostroji sa v prvom rade urobila kalibrácia vodiacej trubky pomocou vodováhy, aby bola nastavená kolmo k vodorovnej rovine. Pri tomto úkone sa manipulovalo so štyrmi skrutkami typu M8×40.
2. Ďalej sa vycentroval valcový podstavec presne pod vodiacu trubku a zariadenie bolo viacmenej pripravené k prvotnému použitiu.
3. Nasledovalo nastavenie vzorky a požadovanej výšky dopadu. Detailný postup je uvedený nižšie. Pre jasnú a zreteľnú orientáciu sú pod textom postupu umiestnené obrázky z CAD programu.
 - a. Na podstavec sa položila a vycentrovala vzorka s hladkou stranou povrchu tak, aby na drsnú stranu (od odtrhávacej tkaniny) dopadal impaktor (obrázok 3-1).
 - b. Padajúce závažie s impaktorom sa opatrne oprelo na vzorku (obrázok 3-2) a na tyči sa nastavil posuvník zarovno hrany vodiacej trubky (obrázok 3-3).
 - c. Potom sa zmerala vzdialenosť posuvníka od konca tyče (pri všetkých vzorkách bola rovnaká) a k tejto hodnote sa ešte pripočítala potrebná hodnota výšky, ktorá odpovedala požadovanej potenciálnej energii (obrázok 3-4). Na túto vzdialenosť sa fixne priskrutkoval posuvník pre dané meranie. Hodnoty uvedené na obrázkoch sú ilustratívne, no v tomto prípade by odpovedali energii $E_p = 5 \text{ J}$.
4. Na záver sa overila funkčnosť a správnosť aparatury na zopár náhradných uhlíkových vzorkách. Takisto sa natrénovalo spomínané vkladanie plechového plátu kvôli zabráneniu opätovným nárazom. Po tomto kroku bol už padostroj pripravený na experimenty.



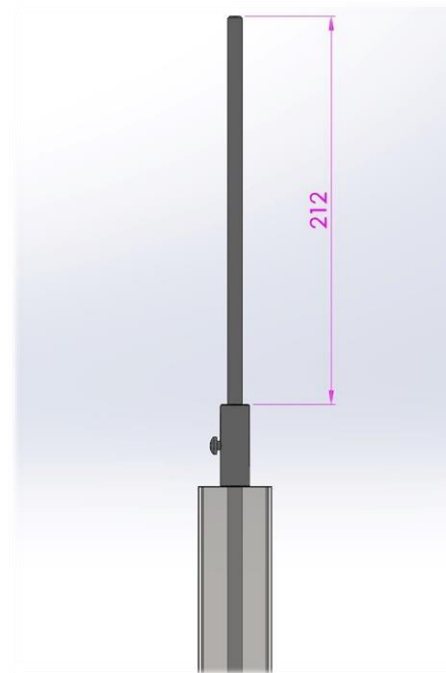
Obr. 3-1 Položenie vzorky na podstavec



Obr. 3-2 Opretie impaktoru na vzorku



Obr. 3-3 Nastavenie posuvníka na hranu trubky



Obr. 3-4 Pripočítanie hodnoty výšky dopadu

3.2 Výsledky

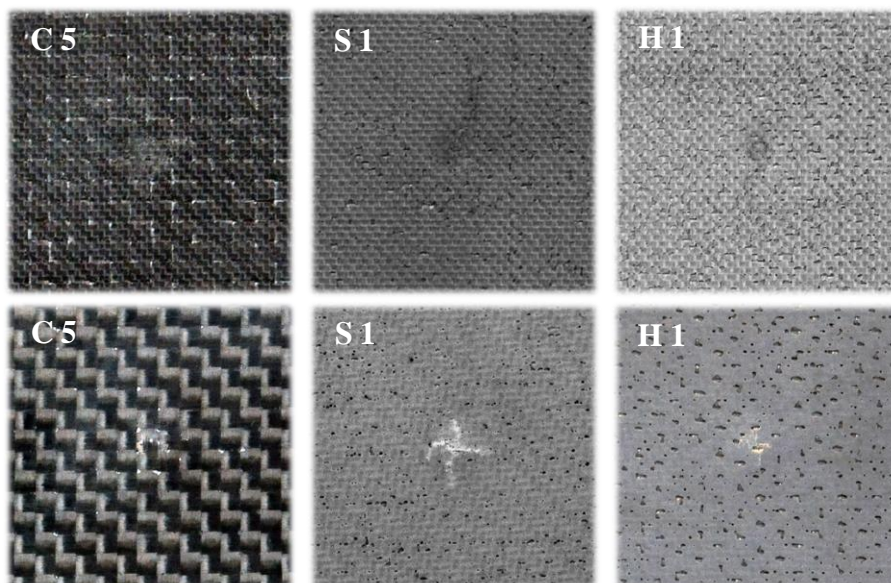
Vzorky sa najskôr riadne označili pre účely rozpoznania dopadových energií a potom sa vykonali rázové skúšky. Tabuľka 3-1 znázorňuje značky nalepené na strane hladkého povrchu umiestnené približne dvadsať milimetrov od okraja. Nepoškodené vzorky nadobudnú zmysel až pri porovnaní mechanických vlastností pri ohybových skúškach.

Tab. 3-1 Značenie použitých vzoriek spolu s dopadovými energiami

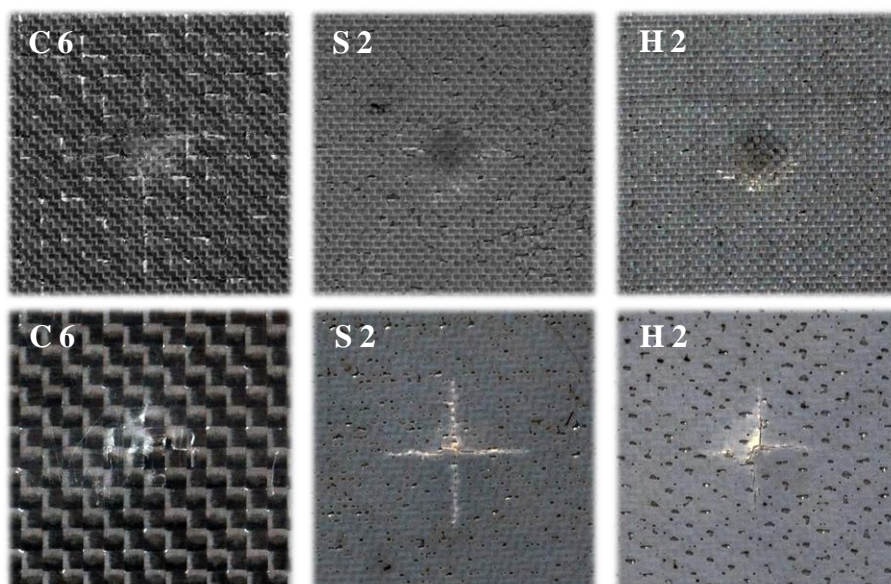
Označenie	Typ kompozitu	Dopadová energia
C5	uhlík	E = 5 J
C6	uhlík	E = 10 J
C7	uhlík	E = 15 J
C4	uhlík	nepoškodený
S1	sklo	E = 5 J
S2	sklo	E = 10 J
S3	sklo	E = 15 J
S4	sklo	nepoškodený
H1	hybrid	E = 5 J
H2	hybrid	E = 10 J
H3	hybrid	E = 15 J
H4	hybrid	nepoškodený

Ešte sa vykonalo zopár meraní na uhlíkových vzorkách s hodnotami energií 2,5 J a 20 J a zistilo sa, že hodnota 2,5 J je príliš malá pre zrejmu identifikáciu delaminácie a hodnota 20 J zase dosť vysoká, pretože na vzorke bol viditeľný evidentný prieraz.

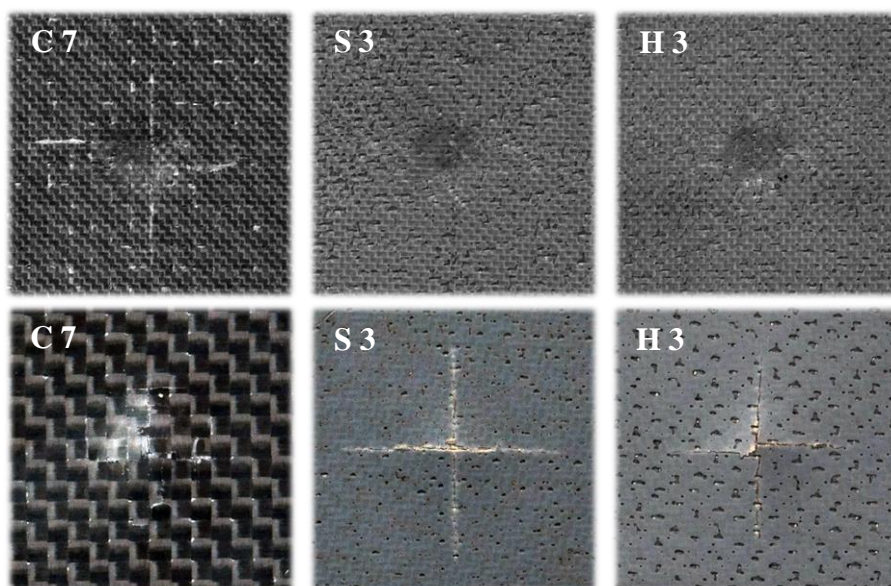
Obrázky 3-5, 3-6 a 3-7 ilustrujú nasnímané povrchy jednotlivých vzoriek po dopadových testoch pomocou digitálneho fotoaparátu Sony DSC-RX10 Mark IV vypožičaného od aerodynamikov Leteckého ústavu FSI.



Obr. 3-5 Vrchná (hore) a spodná (dole) strana vzoriek – energia nárazu 5 J



Obr. 3-6 Vrchná (hore) a spodná (dole) strana vzoriek – energia nárazu 10 J



Obr. 3-7 Vrchná (hore) a spodná (dole) strana vzoriek – energia nárazu 15 J

Vizuálnom metódou sa všetky vzorky z oboch strán dôkladne skontrolovali, predovšetkým oblasť poškodenia, a premerali sa posuvným meradlom šírky trhlín v pozdĺžnom a priečnom smere, respektíve v smere osnovy a útoku. Táto metóda vyobrazuje len povrchové vady, nie však možnú delamináciu ukrytú pod povrchom. Takisto meranie pomocou posuvného meradla v milimetroch s presnosťou jedného desatinného miesta nie je úplne vyhovujúce. Vyhodnotenie sa uskutočnilo aj napriek zmieneným nedostatkom a veľkosti trhlín sa zaznamenali do tabuľky 3-2. Výsledky bolo možné porovnať s termovíznou nedeštruktívnou kontrolou a na základe toho sa určili rozdiely v jednotlivých vyhodnocovacích analýzach, na čo aj odkazuje podkapitola 6.1.

Tab. 3-2 Rozmery trhlín v pozdĺžnom a v priečnom smere pri vizuálnej metóde

Označenie vzorky	Rozmer trhliny [mm] - DP		Rozmer trhliny [mm] - HP	
	Pozdĺžny smer	Priečny smer	Pozdĺžny smer	Priečny smer
C5	4,8	5,6	5,7	5,3
C6	16,0	15,4	9,0	7,9
C7	25,6	17,3	12,4	14,8
C4	-	-	-	-
S1	4,2	4,6	5,3	5,7
S2	5,8	6,2	13,6	13,5
S3	7,6	7,2	21,8	20,4
S4	-	-	-	-
H1	2,9	3,6	2,2	3,9
H2	6,4	5,8	9,8	11,2
H3	7,5	7,6	16,8	17,7
H4	-	-	-	-

DP – drsný (matný) povrch – vrchná strana vzorky, kam dopadá impaktor

HP – hladký (lesklý) povrch – spodná strana vzorky

Z tabuľky 2-3 je zrejmé, že povrchová vrstva uhlíkového kompozitu na strane dopadajúceho impaktoru je náchylnejšia na vznik rozsiahlejších trhlín, pretože vytvorená preliačina bola totiž pri vyšších energiách výrazne obsiahlejšia. Vyplýva to hlavne z dôvodu, že uhlíkové vzorky mali tendenciu pri rázoch absorbovať viac kontaktnej sily, ako sklenený i hybridný laminát, od ktorých sa impaktor odrážal do väčšej výšky. A keďže uhlík na vrchnej strane pohltí viacej energie ako sklo alebo hybrid, tak aj veľkosť trhliny tu bola pozorovateľne rozsiahlejšia. Z toho teda vyplýva, že sklo malo pri experimentoch vyššiu húževnatosť, ako uhlík.

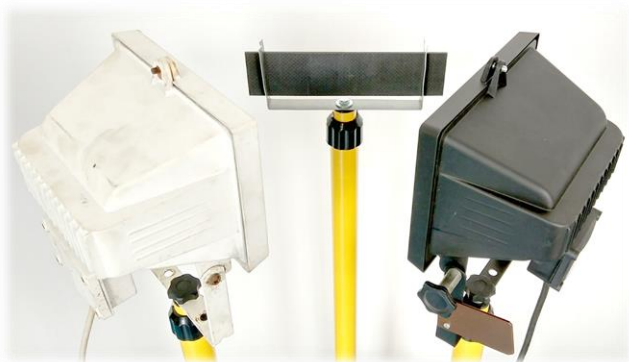
Na spodnej strane vzoriek je situácia opačná. Vznikla tu vypuklina s viacerými drobnými trhlínami rozvetvujúcimi sa z tých hlavných, ktorých šírenie postupovalo v dvoch základných smeroch (v pozdĺžnom a priečnom). Tento jav sa preukázal len pri uhlíku a zároveň aj inicioval, viditeľne a zreteľne, oblasť poškodenia na hladkom spodnom povrchu. Vypuklina pri uhlíku bola najvýraznejšia, menej zrejmalá bola pri hybride a najmenej intenzívna bola pri skle. Paradoxom je, že poradie, týkajúce sa veľkosti trhlín, je úplne opačné: najhoršie dopadlo sklo, hybrid potom významne lepšie a od neho ešte o niečo lepšie uhlík.

4 NDT – TERMOVÍZIA

Termovízna nedeštruktívna analýza prebiehala v tzv. „čistej miestnosti“ (2.02) v budove C3A Leteckého ústavu. Na obsluhu a manipuláciu s termovíznou aparaturou postačoval jeden človek. Dôležitá bola nemennosť zvolených podmienok pri jednotlivých meraniach: napríklad muselo sa zamedziť nadmernému vnikaniu svetla z vonkajšieho prostredia do miestnosti (čím nižší jas svetla v miestnosti, tým lepšie výsledky z termokamery), aparátúra so stojanmi a kamerou musela vždy ostať na pôvodnom mieste, vzorka vkladaná do pomocného rámiku uchyteného na stojane musela byť každý raz vycentrovaná presne na stred šošovky termokamery a iné.

4.1 Priebeh experimentov

Súprava pre termovíznú analýzu pozostávala zo šiestich sústav: stojan s rámikom na vzorky, dva halogénové reflektory na stojanoch, termokamera, počítač a časový spínač k prívodu elektrickej energie. Prvé štyri diely v akcii možno vidieť na obrázku 4-3.



Obr. 4-2 Nastavenie halogénových reflektorov



Obr. 4-1 Ohrievanie vzorky reflektormi



Obr. 4-3 Zostava aparatury IR termovízie

Pracovný postup a príprava celej súpravy na merania sa riadila nasledujúcim krokmi:

1. V miestnosti sa vybralo vhodné miesto k umiestneniu stojanu s rámikom pre vzorky, tak aby sem dopadalo čo najmenej prirodzeného svetla a pozadie malo rovnomernú farbu.
2. K stojanu s rámikom pre vzorky sa pridali a nastavili do jednej roviny dva halogénové reflektory Emos typu 0201 (viď obrázok 4-2), každý s príkonom 500 W, aby bola splnená podmienka impulznej odrazovej IR termovízie. Dôležité bolo, aby sa zachoval rovnaký uhol dopadu vyžiareného žiarenia s určitou vlnovou dĺžkou premieňajúceho sa na teplo a takisto aj identická vzdialenosť oboch lúčov od povrchu kompozitu.

3. Potom sa do sústavy pridala IR termokamera FLIR SC660, zhruba pol metra od povrchu vzorky, a vycentrovala sa presne na stred snímania poškodenia v kompozite. K tomuto kroku dopomohol 5,6 palcový LCD displej, ktorým kamera disponuje (viď obrázok 4-3).
4. Ďalej sa termokamera pripojila k príslušnému počítačovému zariadeniu na pozorovanie merania v reálnom čase. Notebook bol vybavený programom ThermaCAM Researcher 2.10 Pro, ktorý zaznamenával obrázky v časových sekvenciách pri ohreve a následnom chladnutí.
5. Na záver sa reflektory pripojili k časovému spínaču elektrickej energie, aby bol dodržaný jednotný čas ohrevu pri všetkých vzorkách.

Po splnení uvedeného stručného postupu sa prešlo ku kalibrácii zostavy a testovaniu optimálneho času ohrevu. Hodnoty tejto doby sa navolili tak, aby sa automaticky reflektor vypol po 3, 5, 7, 10 a 15 sekundách. Podľa testov sa preukázalo, že najefektívnejšia doba bola sedem sekúnd, kedy sa poškodenia na vzorkách javili ako najostrejšie.

Ďalším dôležitým prvkom vstupujúcim do experimentu bola emisivita. Pri kompozitných materiáloch sa nastavila na hodnotu 0,98 a zadala sa do príslušného programu. Ďalej sa doplnila zmeraná vzdialenosť šošovky termokamery od povrchu vzorky, ktorá bola 0,47 m. Pre úplnosť sa dopísala atmosférická teplota s hodnotou 25 °C a relatívna vlhkosť s číslom 50 %. Tieto uvedené vstupné parametre potreboval viesť program ThermaCAM Researcher 2.10 Pro pred tým, ako začal zaznamenávať samotné pokusy a aby mohol správne vyhodnotiť požadované výsledky.

4.2 Spracovanie údajov pre hodnotenie výsledkov

Po vyhotovení sekvencií od všetkých vzoriek programom ThermaCAM prišla na rad kontrastná analýza ako vhodný nástroj na finálne spracovanie množstva obrázkov, aby sa určil vždy len ten najlepší. K tomuto účelu, teda najmä pre nedeštruktívne vyhodnotenie výsledkov z rázových skúšok aplikovaných na kompozitných materiáloch, poslužil profesionálny software LabIR® NDT vyvinutý na pracovisku Nové technológie – výskumné centrum, Západočeská univerzita v Plzni [27]. Podstatou kontrastnej metódy je kvantitatívna miera rozdielu medzi hodnotami povrchovej teploty nad defektom a nad nepoškodeným materiálom. Táto miera rozdielu je charakterizovaná štandardným termickým kontrastom a vypočíta sa na základe rovnice (4.1) [28], ktorá má tvar:

$$C(t) = \frac{T_{def}(\tau) - T_{def}(\tau_0)}{T_s(\tau) - T_s(\tau_0)} \quad (4.1)$$

kde:

C je štandardný termický kontrast;

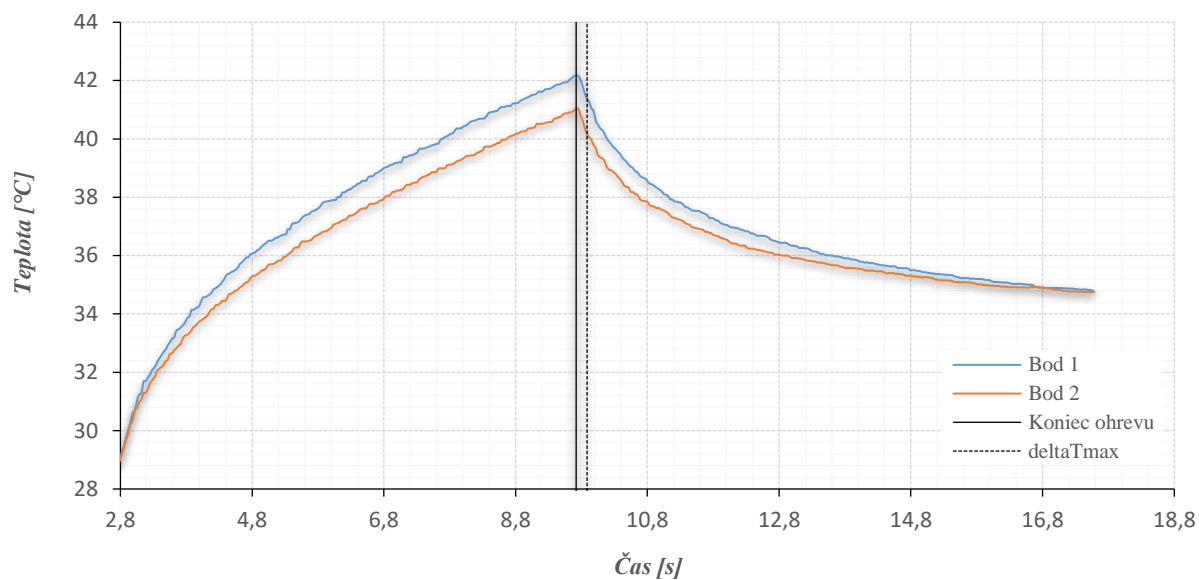
T_{def} povrchová teplota nad defektom, v °C;

T_s povrchová teplota nad nepoškodeným materiálom, °C;

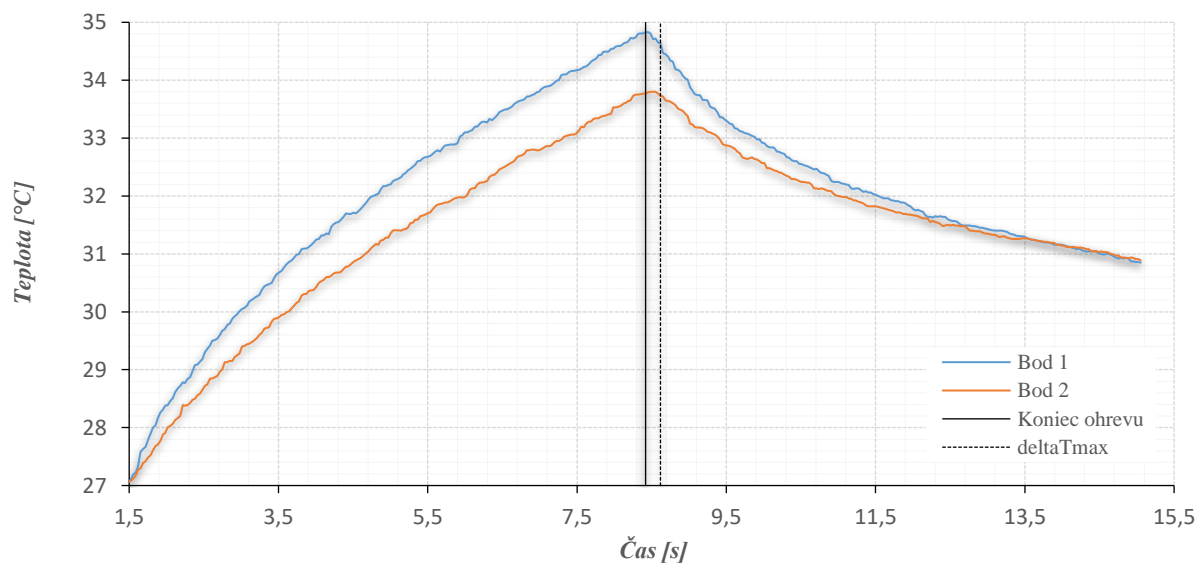
τ aktuálny čas procesu ochladzovania, v s;

τ_0 aktuálny čas tesne pred impulzným ohrevom, v s.

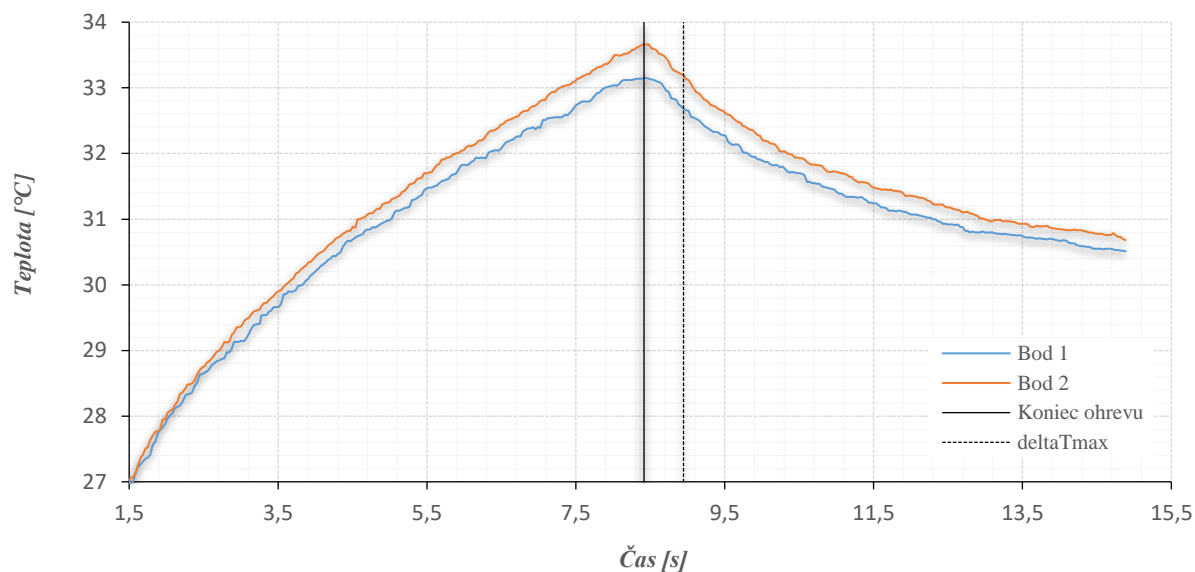
Kontrastná analýza zohľadňuje už aj dobu ohrevu, ale žiaduci a zároveň hľadaný výsledok sa nachádza za bodom konca ohrevu, čiže pri ochladzovaní. Pre potreby tejto práce sú uvedené ako príklad tri grafy zobrazujúce túto metódu na každom type kompozitu (viď obrázok 4-4, 4-5, 4-6). Diagramy sa exportujú tak, že v sekvencii snímok sa umiestnia dva body (vertikálne nad sebou) na vzorku – na poškodené a na nepoškodené miesto. Pre tieto dva body sa vygenerujú teplotné krivky v závislosti na čase, z ktorých sa určí najväčší rozdiel (ΔT_{max}). Tento rozdiel potom odpovedá v sekvencii práve tej najvhodnejšej snímke pre vyobrazenie skúmaného poškodenia po dopadových skúškach.



Obr. 4-4 Diagram kriviek ohrevu a chladnutia dvoch rôznych bodov pri uhlíkovom kompozite ($E = 10 \text{ J}$)

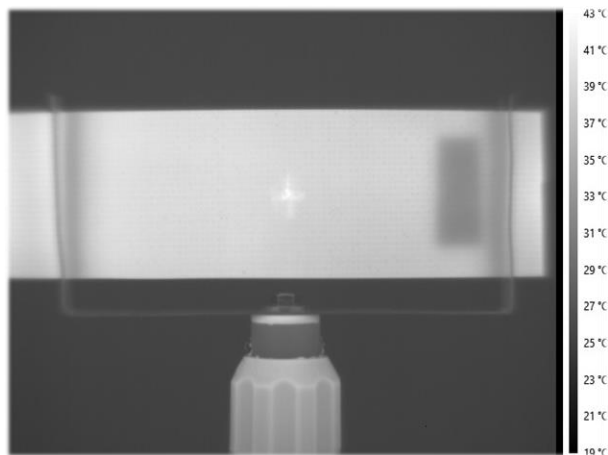


Obr. 4-5 Diagram kriviek ohrevu a chladnutia dvoch rôznych bodov pri sklenenom kompozite ($E = 15 \text{ J}$)

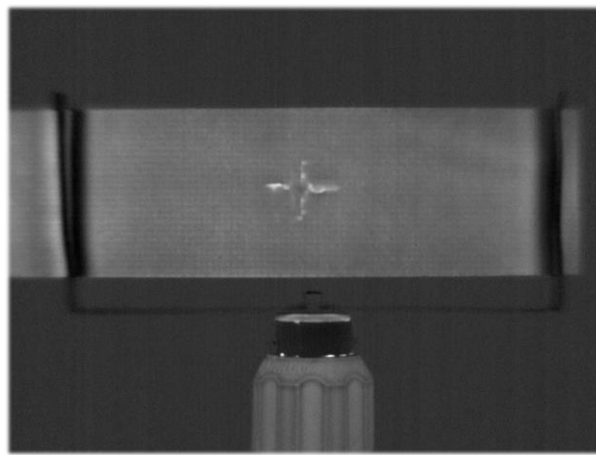


Obr. 4-6 Diagram kriviek ohrevu a chladnutia dvoch rôznych bodov pri hybridnom kompozite ($E = 5 \text{ J}$)

Po vykonaní kontrastnej analýzy koncipovanej na základe programu LabIR[®] NDT sa ešte hľadal vhodný rozsah teplotného poľa pre daný snímok v sekvencii, pretože automatické hodnoty teplôt vykazovali vizuálne obrazce s vysokými hodnotami jasu, na ktorých poškodená oblasť takmer splývala s tou nepoškodenou (tento úkaz znázorňuje obrázok 4-7). Po nájdení správneho rozsahu teplôt sa deformovaná oblasť vyobrazila ďaleko výraznejšie (viď obrázok 4-8), takže sa dali ľahko zmerať šírky trhlín na povrchu. Obrázky 4-7 a 4-8 reprezentujú jednu a tú istú uhlíkovú vzorku po dopadovom experimente s aplikovanou energiou nárazu 15 J pred a po úprave.

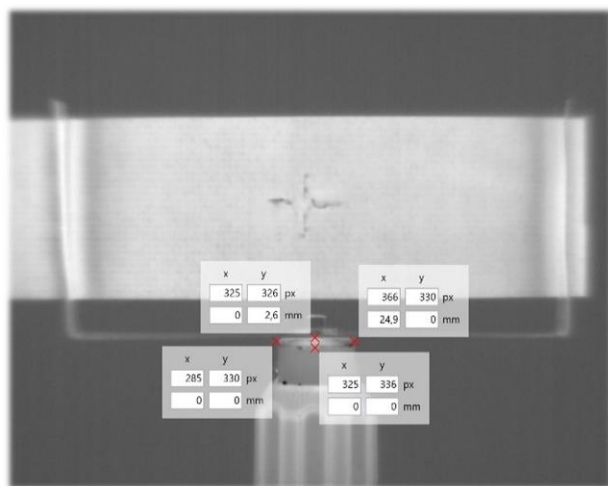


Obr. 4-7 Snímka pred úpravou

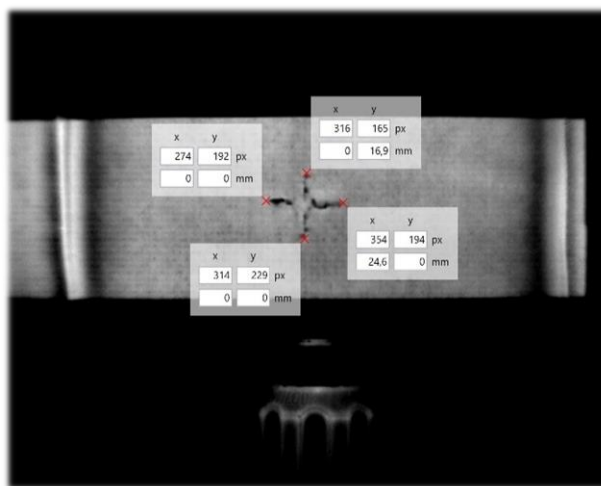


Obr. 4-8 Snímka po finálnej úprave

Meranie rozmerov prasklín prebiehalo priamo v programe LabIR[®] NDT cez vstavanú funkciu „Thermogram transformation“, pričom sa využil jednoduchý prepočet. Posuvným meradlom sa premerali rozmery čiernej plastovej vložky stojana, ktorým v programe náležali príslušné hodnoty pixelov. Potom stačilo trojčlenkou prepočítať údaje náležiacie trhlinám a výsledok bol zrejmý. Na obrázkoch 4-9 a 4-10 je uvedený ilustračný príklad prepočtu. Osa X je orientovaná v horizontálnej rovine (vodorovný smer) a osa Y vo vertikálnej rovine (zvislý smer).



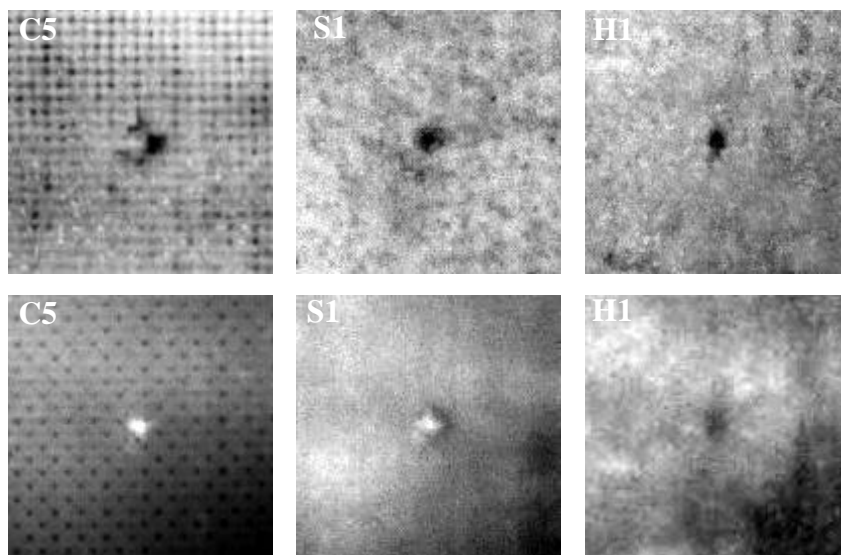
Obr. 4-9 Rozmery plastovej vložky na stojane



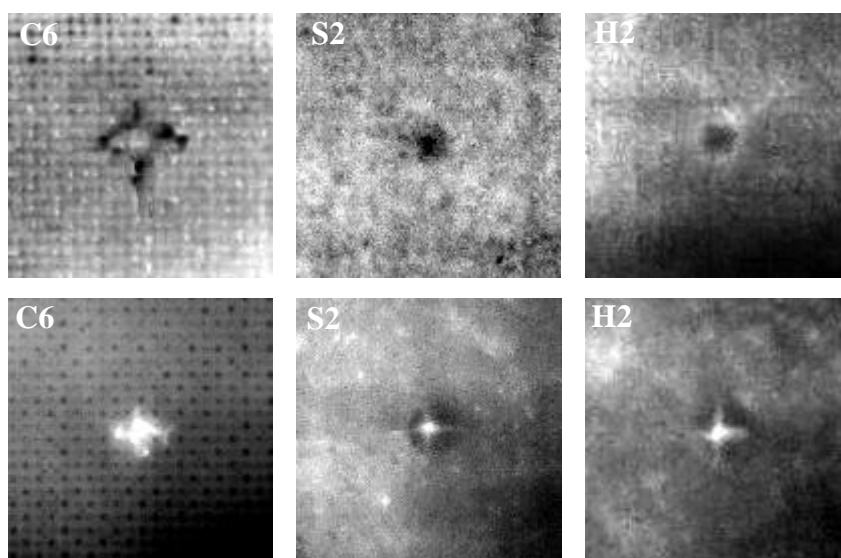
Obr. 4-10 Rozmery trhlín po prepočítaní

4.3 Výsledky

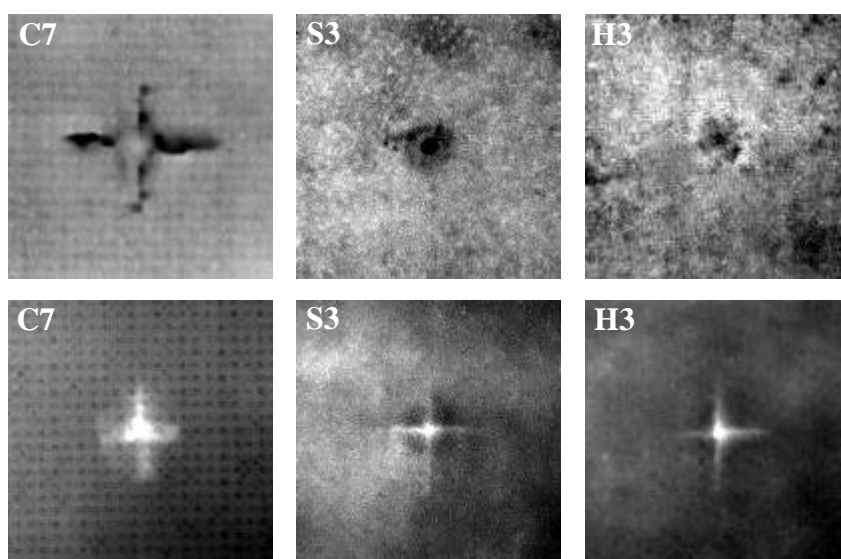
Vizuálne výsledky sú reprezentované snímkami 4-11, 4-12, 4-13. Z obrázkov je jasné, že niektoré povrchy vzoriek neboli dokonale presýtené epoxidom pri vytvrdzovaní, čo sa na snímkach z termovízie javí ako miesta s nerovnomerným tepelným poľom – úroveň jasu je v týchto oblastiach odlišná, avšak poškodené miesto vykazuje ďaleko výraznejšie rozdiely jasu a nachádza sa presne uprostred vzorky, preto sa dá okamžite identifikovať.



Obr. 4-11 Termovízia: vrchná (hore) a spodná (dole) strana vzoriek – energia nárazu 5 J



Obr. 4-12 Termovízia: vrchná (hore) a spodná (dole) strana vzoriek – energia nárazu 10 J



Obr. 4-13 Termovízia: vrchná (hore) a spodná (dole) strana vzoriek – energia nárazu 15 J

Poznámka: na vrchnú stranu vzoriek dopadol impaktor, zatiaľ čo spodná strana bola voľne položená na podstavci padostroja.

Tab. 4-1 Rozmery trhlín v pozdĺžnom a v priečnom smere pri termovíznej metóde

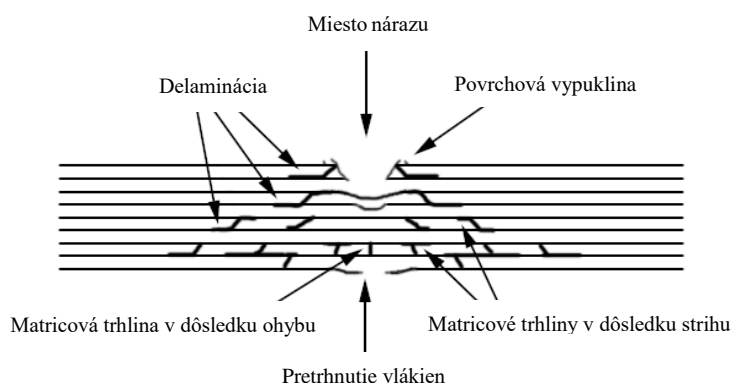
Označenie vzorky	Rozmer trhliny [mm] - DP (MP)		Rozmer trhliny [mm] - HP (LP)	
	Pozdĺžny smer	Priečny smer	Pozdĺžny smer	Priečny smer
C5	9,2	8,5	5,9	4,0
C6	14,8	12,7	11,7	7,4
C7	24,6	16,9	12,9	14,0
C4	-	-	-	-
S1	5,5	4,2	7,1	5,5
S2	6,5	6,6	13,2	9,5
S3	8,6	7,1	17,8	16,4
S4	-	-	-	-
H1	3,7	2,9	6,2	5,3
H2	5,9	4,2	10,5	10,0
H3	7,7	6,9	16,3	14,5
H4	-	-	-	-

DP – drsný (matný) povrch – vrchná strana vzorky, kam dopadá impaktor

HP – hladký (lesklý) povrch – spodná strana vzorky

Z výsledkov tabuľky 4-1 je zrejmé, že rozmery trhlín v pozdĺžnom smere sú spravidla dlhšie ako v priečnom smere. Tento stav môžu reprezentovať napríklad viac namáhané vlákna v pozdĺžnom smere, keďže ich teoretická pevnosť v ťahu je väčšia pri 0° orientácii ako pri 90° . Ďalej tabuľka potvrdzuje zhrnutie z vizuálnej metódy ohľadom absorbovania energie nárazu na dopadovej strane, a síce že uhlík pohltí viacej energie ako sklo pri kontakte s impaktorom vďaka vyššej tuhosti, preto aj oblasť poškodenia je na drsnom povrchu väčšia. V prípade skla a hybridu sa preukázal kužeľový tvar poškodenia po rázovej skúške typický pre kompozitový laminát, ktorý znázorňuje obrázok 4-14. Rozsah znehodnotenia v mieste dopadu impaktora zahŕňa menšiu zdeformovanú oblasť, ako na spodnej strane vzorky, kde nastalo až pretrhnutie jednotlivých vlákien. Takisto treba dodať, že sklenené a hybridné vzorky vykazujú na spodnej strane až dvakrát väčšie rozmery trhlín, ako na vrchnej, dopadovej strane, pretože sklo má ďaleko nižší modul pružnosti ako uhlík, čo spôsobí väčší priehyb a zároveň aj výraznejšie ťahové napätie na spodných vrstvách tkaniny. V neposlednom rade by sa mal klásť podstatný dôraz aj na fakt, že pre potreby vedeckého a experimentálneho výskumu je možné aplikovať a akceptovať kontrolu povrchu z každej strany, čo však neplatí v bežnej praxi, kde prístup k vnútornej strane poťahu či k povrchovej konštrukcii býva častokrát neprístupný, alebo príliš komplikovaný.

Tabuľkové porovnanie a zhodnotenie relatívnych odchýlok rozmerov trhlín pomocou termovíznej a vizuálnej metódy sa nachádza v kapitole 6.1.



Obr. 4-14 Schematický tvar typického nárazového poškodenia kompozitu po hrúbke [1, 29]

5 OHYBOVÉ SKÚŠKY

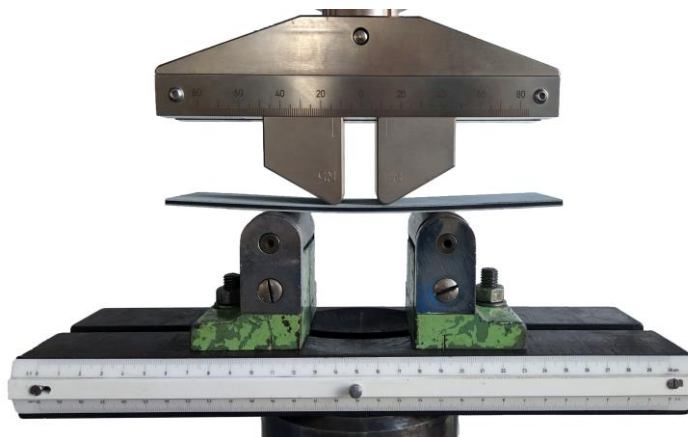
Ohybové skúšky prebiehali na skúšobni 1.01 v budove C3A Leteckého ústavu. Pre experimenty bol použitý univerzálny stroj LabTest 6.500SP1-VM od spoločnosti LaborTech, ktorým sa bližšie zaoberá podkapitola 1.2.3. Na obsluhu zariadenia postačoval jeden človek, ktorý zároveň spĺňal funkciu ako nastavovaciu, tak aj vyhodnocovaciu (kontrola priebehu skúšok na počítači pomocou programu Test&Motion).

5.1 Priebeh experimentov

Pracovný postup, teda hlavne podmienky skúšky, vychádzali z normy ČSN EN ISO 14125. Stroj LabTest 6.500SP1-VM komunikoval už so spomínaným programom Test&Motion a obsahoval pre potreby štvorbodového ohybu podstavec s dvomi stacionárnymi podporami s polomeri $R = 15 \text{ mm}$ a dvomi zaťažovacími (tlačnými) hrotmi s polomeri $R_2 = 5 \text{ mm}$. Podpory s polomeri 5 mm (doporučené normou) síce neboli k dispozícii, avšak na posúdenie a porovnanie zvyšnej ohybovej pevnosti vzoriek boli zvolené podmienky nadmieru dostačujúce.



Obr. 5-1 Stroj LabTest 6.500SP1-VM



Obr. 5-2 Hybridná vzorka v sústave



Obr. 5-3 Deštrukcia hybridnej vzorky

Pri príprave na ohybové skúšky sa postupovalo nasledovne:

1. Do horného (tlačného) skľučovadla zariadenia LabTest 6.500 (viď obrázok 5-1) sa vložili zaťažovacie hroty a na spodný podstavec s číselníkom sa umiestnili podpory.
2. Podstavec aj zaťažovacie hroty sa nastavili do odpovedajúcich vzdialeností podľa normy ČSN EN ISO 14125 pre štvorbodové zaťažovanie (viď obrázok 1-4, podkapitola 1.1.2). Pre triedu materiálu III (napr. systémy so sklenenými vláknami, v tomto prípade aj hybrid)

sa zvolil pomer $L/t = 22,5$ a pre triedu IV (napr. systémy s uhlíkovými vláknami) sa vybral pomer $L/t = 40,5$. Hrúbka vzoriek t sa spriemerovala zo všetkých hodnôt (podrobnosti sú uvedené v tabuľke 5-1). Z týchto údajov sa dostali hodnoty pre jednotlivé rozostupy:

- Trieda materiálu III – vzdialenosť podpier $L = 85,5$ mm, rozstup zaťažovacích hrotov $L' = 28,5$ mm.
 - Trieda materiálu IV – vzdialenosť podpier $L = 153,9$ mm, rozstup zaťažovacích hrotov $L' = 51,3$ mm.
- Po nastavení potrebných rozostupov na podporách a zaťažovacích hrotoch stačilo vložiť vzorku medzi tieto dve pomôcky (viď obrázok 5-2) a vypočítať rýchlosť zaťažovania.
 - Ešte pred samotnými experimentami sa vykonalo jedno kalibračné meranie na rezervnej vzorke, či aparátúra funguje správne. Potom sa už mohlo začať testovať.
 - Názornú ukážku výsledného poškodenia hybridnej vzorky H4 zobrazuje obrázok 5-3. Typ porušenia, ktoré tu nastalo, je ťahové poškodenie spodnej vrstvy.

Tab. 5-1 Rozmerová analýza všetkých použitých vzoriek

Označenie	Typ kompozitu	Dopadová energia	Dĺžka [mm]	Šírka [mm]	Hrúbka [mm]
C5	uhlík	E = 5 J	199	55,25	3,75
C6	uhlík	E = 10 J	199	55,2	3,8
C7	uhlík	E = 15 J	199	55,3	3,9
C4	uhlík	nepoškodený	199	55	3,9
S1	sklo	E = 5 J	197	56	3,7
S2	sklo	E = 10 J	198	55,9	3,75
S3	sklo	E = 15 J	201	56	3,8
S4	sklo	nepoškodený	201	56	3,75
H1	hybrid	E = 5 J	199	56	3,8
H2	hybrid	E = 10 J	201	55,9	3,8
H3	hybrid	E = 15 J	199	56	3,8
H4	hybrid	nepoškodený	201	56	3,85

5.2 Teoretické výsledky

Teoretická rýchlosť zaťažovania podľa zdroja [5]:

$$v_{z, teor} = \frac{\varepsilon' L^2}{4,7 t} = \frac{0,01 \cdot 153,9^2}{4,7 \cdot 3,8} = 13,26 \text{ mm/min} \quad (5.1)$$

Vypočítaná teoretická rýchlosť zaťažovania bola podľa normalizovanej tabuľky 1-4 blížiac sa skôr hodnote 10 mm/min, ktorá bola zvolená pre všetky ohybové skúšky z dôvodu zachovania rovnakých podmienok.

Typické vlastnosti kompozitov, pri ktorých sa dá predpokladať hodnota maximálnej ohybovej sily pre nepoškodenú vzorku: uhlík a sklo (výpočet vychádza z rovnice 1-6) :

$$\text{Uhlík (C4):} \quad F = \frac{\sigma_f b t^2}{L} = \frac{1000 \cdot 55 \cdot 3,9^2}{153,9} = 5\,435,67 \text{ N} \quad (5.2)$$

$$\text{Sklo (S4):} \quad F = \frac{\sigma_f b t^2}{L} = \frac{700 \cdot 56 \cdot 3,75^2}{85,5} = 6\,447,37 \text{ N} \quad (5.3)$$

5.3 Praktické výsledky

Výsledky maximálnych ohybových síl všetkých vzoriek zo skúšobného zariadenia sprostredkoval program Test&Motion v konfigurácii pre najvyššiu silu do 10 kN. Ohybové napätia sa prepočítali na základe rovnice 1-6, pričom tu vystupovali veličiny individuálne pre každú vzorku. Porovnanie hodnôt ohybových vlastností testovaných uhlíkových, sklenených a hybridných kompozitov znázorňuje tabuľka 5-2. Odchýlka experimentálnych hodnôt od tých teoreticky predpokladaných pri štvorbodovom ohybe v prípade dosiahnutia maximálnej sily pri C4 bola 29,43 % a pri S4 bola 27,09 %. Hodnoty pevností v ohybe (uhlík 1000 MPa a sklo 700 MPa) vychádzajú z tabuliek typických vlastností prepregových laminátov s epoxidovou matricou.

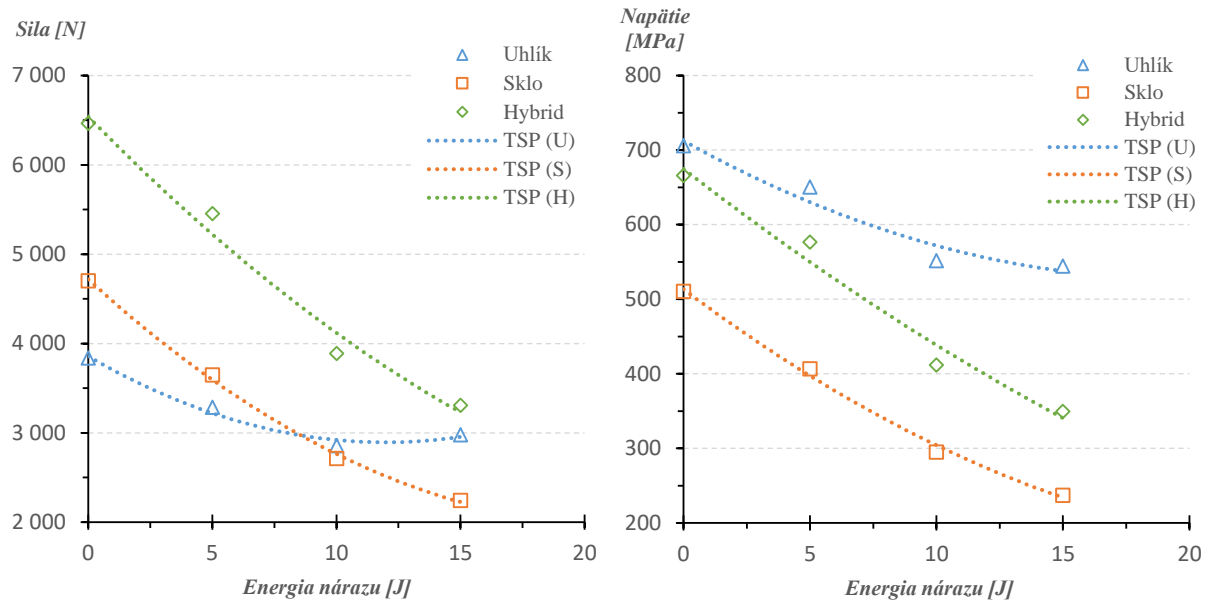
Tab. 5-2 Ohybové vlastnosti skúšaných uhlíkových, sklenených a hybridných kompozitov

Označenie vzorky	Maximálna sila [N]	Ohybové napätie [MPa]
<i>Energia nárazu: 0 J*</i>		
C4	3 836,11	705,73
S4	4 700,69	510,36
H4	6 464,06	665,83
<i>Energia nárazu: 5 J</i>		
C5	3 284,32	650,56
S1	3 646,16	406,64
H1	5 454,81	576,75
<i>Energia nárazu: 10 J</i>		
C6	2 856,52	551,53
S2	2 711,84	294,96
H2	3 886,35	411,65
<i>Energia nárazu: 15 J</i>		
C7	2 976,23	544,57
S3	2 242,68	237,13
H3	3 305,62	349,51

* nepoškodené vzorky sú uvedené s energiou nárazu 0 J

Tabuľka 5-2 poukazuje na fakt, že maximálna ohybová sila pri štvorbodovom zaťažovaní sa dosiahla prirodzene pri nepoškodených vzorkách, z ktorých najvyššiu hodnotu javil hybridný kompozit, ale nepreukázal väčšiu ohybovú pevnosť ako čistý uhlík. Tendencia maximálnej sily pri zvyšovaní dopadovej sily mala klesajúci charakter, až na jednu výnimku, pri ktorej uhlík C7 s energiou nárazu impaktora 15 J vydržal zhruba o 120 N väčšiu silu, ako vzorka C6. Tu by bolo vhodné zopakovať viacej meraní pri rovnakých podmienkach a naozaj overiť túto tendenciu, pretože pri vykonaných experimentoch nebol k dispozícii dostatočný počet vzoriek. V prvotnom náznaku udania smeru, ktorým by sa táto charakteristika uchýľovala, je to však postačujúce. Predpoklad by bol taký, že výsledky by sa spresnili a následné extrémne výkyvy hodnôt by boli eliminované. Ďalej z tabuľky 5-2 plynie rapídne zníženie ohybovej pevnosti sklenených vzoriek, kedy pri dopadovej energii 15 J poklesla ohybová pevnosť o viac ako 50 %. Tento priebeh výrazného zníženia je vykreslený na obrázku 5-4 (diagramy reprezentujú klesajúci trend ohybovej sily a ohybového napätia, respektíve pevnosti, ako funkciu narastajúcej energie nárazu. Bodkové čiary predstavujú doplnujúcu polynomickeú trendovú spojnicu druhého stupňa, ako názorný ukaz znížujúceho sa priebehu dosiahnutia výsledných hodnôt ohybových síl a napätí pri zväčšujúcej sa dopadovej sile, čiže rozmerovo rastúcej oblasti poškodenia.

Poznámka: detailnejší rozbor výsledkov z ohybových skúšok je popísaný v podkapitole 6.2.



Obr. 5-4 Maximálna sila ako funkcia rastúcej energie nárazu (vľavo) a ohybové napätie ako funkcia rastúcej energie nárazu (vpravo).

6 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Kapitola spočiatku porovnáva relatívne odchýlky v rozmeroch trhlín medzi zvolenými nedeštruktívnymi metódami vyhodnocovania rozsahu poškodenej oblasti, a to medzi vizuálnou kontrolou a termovíziou. Ďalej sa tu rozvádza a hodnotí charakteristika priebehu zvyšnej pevnosti vzoriek z ohybových skúšok pri relatívnej závislosti dosiahnutých síl a napätí na zvyšujúcej sa dopadovej energii impaktora, a teda väčšej poškodenej oblasti.

6.1 Porovnanie vizuálnej a termovíznej kontroly

Pri vizuálnej metóde je hodnotenia rozsahu poškodenia jasne limitované iba na povrchovú vrstvu. Naopak pri patričnej vyhodnocovacej termovíznej analýze a za vhodných podmienok možno pozorovať malý náznak rozsahu delaminovanej oblasti v blízkych podpovrchových vrstvách (viď uhlíkové vzorky na obrázkoch 4-11, 4-12 a 4-13). Tieto deformácie sa vyobrazujú i pri sklenených a hybridných kompozitoch, avšak až pri vyšších dopadových energiách (15 J a viac).

Najväčšie odlišnosti medzi dvomi nedeštruktívnymi kontrolami zhodnotenými tabuľkou 6-1 sa prejavili pri vzorke H1, kedy rozdiely v určení veľkosti trhliny v smere osnovy dosiahli viac ako 60 % a v smere útoku takmer 30 %. Výrazné odchýlky sú zrejmé aj pri vzorke C5, a síce rozdiel skoro 50 % v pozdĺžnom smere a okolo 34 % v priečnom smere. Všeobecne možno skonštatovať, že pri nízkych dopadových energiách sa vyskytla minimálne v jednom z dvoch smerov najväčšia chyba v porovnávaní dvoch metód hodnotiacich veľkosti trhlín. Postupne boli menšie odchýlky dosiahnuté až pri najvyšších testovaných energiách nárazu, napríklad pri vzorke C7.

Úskaliami vizuálnej metódy spočívajú predovšetkým v použitom type meradla a dôležitým faktorom je takisto zrak, eventuálne zdravotný stav, kompetentnej osoby. Pri termovíznej analýze hrá značnú úlohu kvalifikovaný personál (napr. dôležitosť nastavenia počiatočných parametrov), ďalej použitá technika a podmienky merania – rozlíšenie termokamery, profesionálny software, dodatočné analýzy pre jasnejšie zviditeľnenie deformácií atď.

Tab. 6-1 Relatívne odchýlky v kontrolách medzi vizuálnou a termovíznou metódou

Označenie vzorky	Relatívny rozdiel [%] - DP (MP)		Relatívny rozdiel [%] - HP (LP)	
	Pozdĺžny smer	Priečny smer	Pozdĺžny smer	Priečny smer
C5	47,99	33,71	2,49	25,28
C6	7,70	17,71	23,02	6,43
C7	3,86	2,34	4,04	5,46
S1	24,16	8,17	25,10	2,74
S2	10,23	6,06	2,73	29,60
S3	11,77	1,00	18,15	19,76
H1	21,45	19,33	64,25	26,14
H2	8,67	27,17	6,31	10,43
H3	2,49	9,68	2,94	17,97

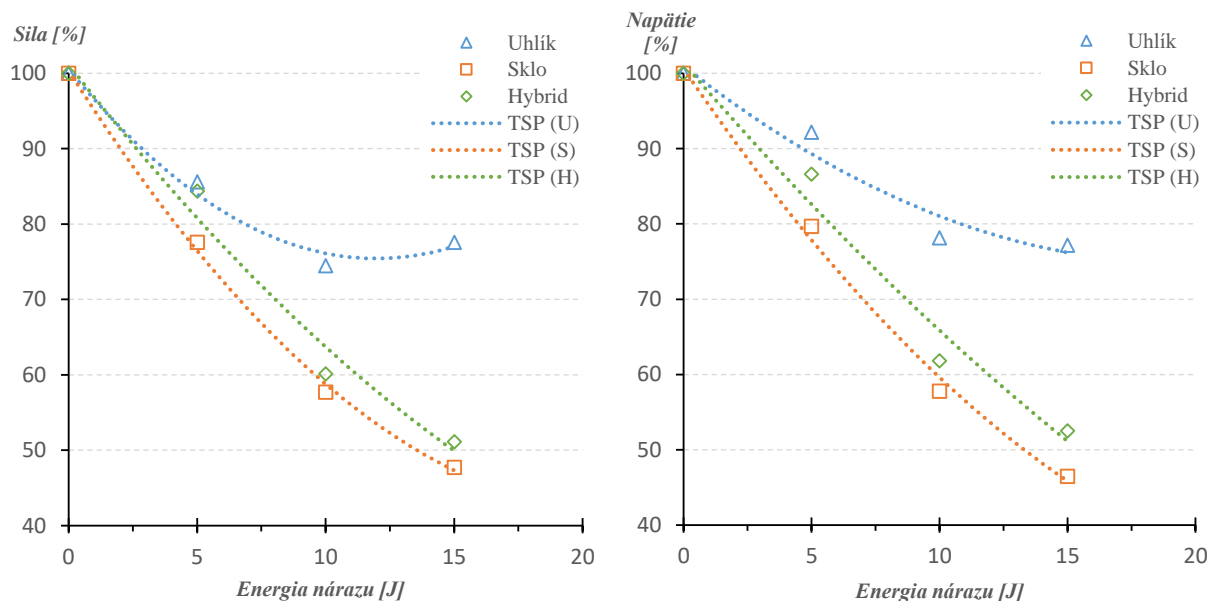
6.2 Zhodnotenie ohybových skúšok

Tendencie zostupného zmyslu usporiadania laminátov od nepoškodených vzoriek až po najvyššie rázové energie reprezentujú diagramy na obrázku 6-1. Najvýraznejší pokles ohybového napätia

sa prejavil na sklenených kompozitoch, kedy pri vzorke S1 poškodenou dopadovou energiou 5 J poklesla ohybová pevnosť o viac ako 20 % a pri 15 J bol tento prepád najpodstatnejší (vzorka S3 stratila ohybovú pevnosť o približne 53 % zo svojej pôvodnej hodnoty – vid' tabuľka 6-2). Najlepšie sa zachoval čistý uhlíkový laminát, keďže s rastúcou energiou nárazu, a teda aj zväčšujúcou sa deformovanou plochou, nevykazoval až tak významný pokles ohybovej pevnosti z východiskovej nepoškodenej vzorky. Pri 15 J sa znížila jeho pevnosť najviac o 33 %. Ohybové vlastnosti hybridného kompozitu sa nachádzali pochopiteľne medzi uhlíkom a sklom, pričom uhlík zvýšil výrazne pevnosť a sklo zase pružnosť materiálu, čo sa odzrkadľuje na maximálnej ohybovej sile, pri ktorej nastala deformácia čisto ťahovým porušením sklenených, a zopár vrstiev uhlíkových, vlákien v spodných vrstvách vzorky.

Tab. 6-2 Porovnanie relatívnych ohybových vlastností testovaných vzoriek

Vzorka	Maximálna sila [%]	Ohybové napätie [%]
<i>Energia nárazu: 0 J</i>		
C4	100	100
S4	100	100
H4	100	100
<i>Energia nárazu: 5 J</i>		
C5	85,62	92,18
S1	77,57	79,68
H1	84,39	86,62
<i>Energia nárazu: 10 J</i>		
C6	74,46	78,15
S2	57,69	57,79
H2	60,12	61,83
<i>Energia nárazu: 15 J</i>		
C7	77,58	77,16
S3	47,71	46,46
H3	51,14	52,49



Obr. 6-1 Relatívna ohybová sila ako funkcia rastúcej energie nárazu (vľavo) a relatívne ohybové napätie ako funkcia rastúcej energie nárazu (vpravo).

ZÁVER

V tejto diplomovej práci sa riešila problematika chovania kompozitov s vystuženými uhlíkovými a sklenenými vláknami s epoxidovou matricou a ich odolnosť proti padajúcemu telesu vo forme valcového závažia s pologuľatým ukončením (impaktorom o definovanom priemere).

Prvá časť práce sa venuje teoretickej podstate rázových skúšok dopadom, ktoré využívajú na dosiahnutie potrebnej kinetickej energie tiažové zrýchlenie. Ďalej sa tu rozoberá hlavný princíp ohybových skúšok, predovšetkým so štvorbodovým zaťažovaním, potom sa tu ešte uvádza zopár vhodných, sériovo vyrábaných aparátúr pre tieto účely. Rešeršnú časť ukončuje klasifikácia nedeštruktívnych vyhodnocovacích metód na detekciu rôznych povrchových a podpovrchových deformácií využívaných najmä v leteckom priemysle.

Praktická časť práce je rozdelená a zameraná na dosiahnutie viacero cieľov. Prvým cieľom bolo skonštruovanie jednoduchej aparatúry pre rázové skúšky. Výsledný návrh (príloha C) bol prevedený na padostroj, ktorý môže naďalej plniť účely rázových skúšok v rozsahu energií od 1 J až do 33 J. Značnou nevýhodou týchto testov pomocou padajúceho závažia je možnosť použitia vedenia len vo vertikálnom smere, resp. kolmo k zemi. Praktické využitie na reálnej konštrukcii lietadla by však našlo uplatnenie menšie zariadenie, ktoré by pozostávalo z vodiacej trubky s vnútorne nainštalovanou pružinou. Pružina by tak mohla predať potrebnú kinetickú energiu impaktoru, ktorý by sa vymrštil smerom k povrchu skúšaného miesta aj v inom smere, než len zvislo nadol. Eliminovali by sa značné účinky gravitačnej sily, respektíve tiažového zrýchlenia.

Druhým významným cieľom bola aplikácia vhodnej nedeštruktívnej analýzy zameranej na spoľahlivé vyhodnotenie poškodenej oblasti. Prvú nasadenú kontrolu reprezentovala vizuálna priama metóda, ktorá bola, je a vždy bude limitovaná iba na povrchovú vrstvu, zatiaľ čo termovízia, ultrazvuk, vírivé prúdy, akustická emisia či iné, môžu odhaliť najmä podpovrchové skryté vady (napr. delamináciu, trhliny). Pri termovíznej impulznej odrazovej metóde, ktorá bola použitá, sa podarilo dosiahnuť uspokojivé výsledky azda len pri uhlíkových vzorkách – tie vykazovali oblasť poškodenia vo forme uzatvorenej elipsy v celom rozsahu zvolených dopadových energií. Malé náznaky deformovaného tvaru sa preukázali aj pri sklenených a hybridných vzorkách, avšak len pri vyšších energiách nárazu a na opačnej strane vzoriek, kam nedopadá impaktor. Táto kontrola je akceptovateľná a aplikovateľná iba pre potreby vedeckého výskumu. Z toho plyne, že hodnotenie povrchu poťahu z oboch strán, najmä vnútornej, je v bežnej praxi ťažko uskutočniteľné – možno použiť nepriamu vizuálnu metódu, kedy je optická dráha medzi pozorovateľom a kontrolovaným povrchom prerušená určitými prekážkami. Táto metóda však vyžaduje obsluhu školeným personálom, časovú náročnosť alebo odpovedajúce technické vybavenie (napr. fibroskop, videoskop). Pri detekcii podpovrchových vád sa častokrát využívajú predovšetkým vírivé prúdy, kapilárna metóda, alebo ultrazvuk.

Na záver impulznej odrazovej termovízie sa vykonalo zopár meraní aj prechodovou metódou, čo ale nevykázalo o nič lepšie výsledky a preto bolo testovanie týmto smerom ukončené. I tak bolo treba po všetkých termovíznych meraniach spracovať finálny obraz všetkých vzoriek kontrastnou analýzou, kedy sa zredukoval šum infračervenej kamery a snímky disponovali ostrejším obrazom. Pre výraznejší stupeň výsledkov jednotlivých obrázkov z hľadiska citlivosti, nižšieho rozmazania a rozsahu hĺbky vady v porovnaní s kontrastnou analýzou by bola vhodná buď metóda rekonštrukcie termovízneho signálu či derivačná metóda. Tieto techniky zosilňujú signály odchyľujúce sa od klasického správania chladnutia povrchu tak, že nevychádzajú len z najväčšieho rozdielu teplôt počas chladnutia, ale využívajú tepelnú difúziu, ktorá predikuje vysoko rozpoznateľný signál, bez ohľadu na použitý materiál.

Posledným dôležitým cieľom bolo vykonanie ohybových skúšok štvorbodovým zaťažovaním, pri ktorých sa zisťovala zvyšná pevnosť už poškodených vzoriek oproti nepoškodeným. Z experimentov sa jasne ukázalo, že ohybové porušenie nastalo pri všetkých testovaných telesách medzi zaťažovacím hrotmi, respektíve v oblasti pôsobenia konštantného momentu a bolo v každom prípade ťahového charakteru. Výsledky vykazovali prirodzený pokles pevnosti, pričom najlepšie obstál uhlíkový kompozit – jeho pevnosť ako funkcia narastajúcej dopadovej energie

neklesla pri 15 J ani o jednu tretinu. Najhoršie si viedol čisto sklenený laminát, pretože materiál stratil svoju pevnosť o viac ako polovicu z pôvodnej hodnoty.

Pri maximálnych ohybových napätiach dosiahnutých pri neporušených vzorkách porovnávaných s experimentálnou analýzou preukázali odchýlky od typických hodnôt v celku značné rozdiely: pri uhlíkovom type vlákien sa jednalo o odklon približne 30 % a pri sklenenom type vlákien bola odlišnosť zhruba 27 %. Za týmito rozdielmi bude stáť určite viacej dôvodov, napríklad teoretický objemový podiel vlákien pri uhlíku a pri skle sa pri praktickom vytvrdzovaní mohol znížiť, potom geometria podpor a zaťažovacích hrotov nemusela dokonale doliehať na vzorku po celej šírke, ďalej geometria samotných vzoriek nebola pri všetkých kusoch stopercentne rovnaká, no a v neposlednom rade treba brať do úvahy fakt, že každé meranie pri ohybových skúškach prebehlo len raz. Na presnejšie výsledky by bolo vhodné experimenty s rovnakými podmienkami viackrát zopakovať a výsledné hodnoty spriemerovať.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] *ASM handbook*. 10th edition. Material Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 0-87170-703-9.
- [2] *ASTM D7136/D7136M – 12 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event*. West Conshohocken, Philadelphia: ASTM International, 2012 [cit. 2018-05-16]. Dostupné tiež z: <https://www.scribd.com/doc/302452598/ASTM-D7136-Low-Velocity-Impact>
- [3] A CAE based procedure to predict the low velocity impact response of a composite CAI specimen. *EnginSoft* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.enginsoft.it/applications/aerospace/cai.html>
- [4] *ASTM D6272 – 02 Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending*. West Conshohocken, Philadelphia: ASTM International, 2002 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.astm.org/Standards/D6272.htm>
- [5] *ČSN EN ISO 14125 (640664) A Vlákný vyztužené plastové kompozity – Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1999 [cit. 2018-05-16]. Dostupné tiež z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [6] Dynamické zkoušky. *Strojírenství* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/dynamick-zkouky.html>
- [7] Padostroje řada DPfest. *LaborTech* [online]. 2013 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.labortech.cz/produkty/razove-kladiva-a-padostroje/padostroje-rada-dpfest/>
- [8] HIT 230F Drop Weight Tester at a Glance. *Zwick Roell* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.zwick.com/impact-testing-machine/drop-weight-impact-tester-up-to-230-j>
- [9] Drop Weight Testers. *Instron* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.instron.com.sg/en-sg/products/testing-systems/impact-systems/drop-weight-testers>
- [10] SARASINI, F.; TIRILLO, J.; FERRANTE, L.; VALENTE, M.; VALENTE, T.; LAMPANI, L.; GAUDENZI, P.; CIOFFI, S.; IANNACE, S. a L. SORRENTINO. Drop-weight impact behaviour of woven hybrid basalt carbon/epoxy composites. In: *ScienceDirect* [online]. 2013 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813007075>
- [11] ASTM 6274 3 and 4-Point Bending Fixture for Composites | GD7264-22. *TestResources* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.testresources.net/accessories/by-standards/astm-test-fixtures/astm-d7264-3-and-4-point-bending-fixture-for-composites-gd7264-22/>
- [12] Statické elektromechanické zkušební stroje. *LaborTech* [online]. 2013 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.labortech.cz/produkty/zkusebni-stroje/elektromechanicke-stroje-rada-e/>
- [13] WANG, H. R., LONG, S. C., ZHANG, X. Q. a X.H. YAO. Study on the delamination behavior of thick composite laminates under low-energy impact. In: *ScienceDirect* [online]. 2017 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822317308863>

- [14] ICTEN, B. M., KIRAL, B. G. a M.E. DENIZ. Impactor diameter effect on low velocity impact response of woven glass epoxy composite plates. In: *ScienceDirect* [online]. 2012 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813000796#!>
- [15] Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb. *Ůnabla* [online]. 2010–2013 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.nabla.cz/obsah/fyzika/mechanika/rovnomerne-zrychleny-primocary-pohyb.php>
- [16] Nedestruktivní zkoušky v SKF. *Evolution* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://evolution.skf.com/cs/nedestruktivni-zkousky-v-skf/>
- [17] SUMMERSCALES, John. *Non-destructive testing of fiber-reinforced plastics composites* [online]. Londýn: Elsevier Science Publishers LTD, 1990 [cit. 2018-05-16]. ISBN 1-85166-468-8. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=etBR83OqeTAC&printsec=frontcover&hl=sk#v=onepage&q&f=false>
- [18] MIL-HDBK-787: 1988. *Military standardization handbook: Nondestructive testing methods of composite materials – ultrasonic*.
- [19] MIL-HDBK-731: 1984. *Military standardization handbook: Nondestructive testing methods of composite materials – thermography*.
- [20] Active Thermography for Nondestructive Composites Testing. *Quality Magazine* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/91207-active-thermography-for-nondestructive-composites-testing>
- [21] Aktivní termografie a IRNDT. *Nové technologie – výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni* [online]. 2000 – 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/irndt/aktivni-termografie>
- [22] FAROOQ, U. a P. MYLER. Prediction of load threshold of fibre-reinforced laminated composite panels subjected to low velocity drop-weight impact using efficient data filtering techniques. In: *ScienceDirect* [online]. 2015 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379715000388>
- [23] SEVKAT, E., LIAW, B. a F. DELALE. Drop-weight impact response of hybrid composites impacted by impactor of various geometries. In: *ScienceDirect* [online]. 2013 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026130691300441X>
- [24] HUNG, P., LAU, K., CHENG, L., LENG, J. a D. HUI. Impact response of hybrid carbon/glass fibre reinforced polymer composites designed for engineering applications. In: *ScienceDirect* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836817318309>
- [25] *Hexcel* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.hexcel.com/>
- [26] FLIR SC660. *FLIR® Systems* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.flir.co.uk/cs/display/?id=41413>
- [27] LabIR® NDT – Software pro termografické testování. *LabIR®* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://software.labir.cz/module/ndt>
- [28] MALDAGUE, Xavier P. V. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing* [online]. New York: John Wiley & Sons, 2001 [cit. 2018-05-16]. ISBN 978-0-471-18190-3. Dostupné také z: <https://www.wiley.com/en->

us/Theory+and+Practice+of+Infrared+Technology+for+Nondestructive+Testing-p-9780471181903

- [29] SHYR, T. a Y. PAN. Impact resistance and damage characteristics of composite laminates. In: *ScienceDirect* [online]. 2003 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822303001144>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV

Symbol	Rozmer	Význam
b	[mm]	šírka telesa
C	[-]	štandardný termický kontrast
d_1	[mm]	vonkajší priemer
d_2	[mm]	vnútorný priemer
E_f	[MPa]	ohybový modul pružnosti
E_k	[J]	kinetická energia
E_p	[J]	potenciálna energia
F	[N]	sila
h	[mm]	výška
g	[m/s ²]	tiažové zrýchlenie
l	[mm]	dĺžka telesa
L'	[mm]	vzdialenosť medzi valcovými hrotmi
L	[mm]	vzdialenosť podpier
m	[kg]	hmotnosť telesa
R	[mm]	polomer impaktora
R_1, R_2	[mm]	polomery valcových hrotov
R_a	[μm]	stredná aritmetická úchylka povrchu
s	[mm]	maximálny priehyb v strede telesa
s', s''	[mm]	priehyby v strede telesa
t	[mm]	hrúbka telesa
τ	[s]	aktuálny čas procesu ochladzovania
τ_0	[s]	čas tesne pred impulzným ohrevom
T	[s]	čas
T_{def}	[°C]	povrchová teplota nad defektom
T_s	[°C]	povrchová teplota nad nepoškodeným materiálom
v	[m/s]	rýchlosť telesa tesne nad povrchom vzorky
v_0	[m/s]	počiatočná rýchlosť telesa
v_z	[mm/min]	rýchlosť zaťažovania
y	[m]	dráha
ΔF	[N]	rozdiel síl
Δs	[mm]	rozdiel priehybov
ε	[-]	maximálna deformácia vo vonkajších vláknach
ε'	[-]	rýchlosť deformácie
$\varepsilon_f', \varepsilon_f''$	[-]	ohybové deformácie
σ_f	[MPa]	ohybové napätie vo vonkajšom vlákne

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
AC	<i>Alternating Current</i>	Striedavý prúd
CAD	<i>Computer-aided Design</i>	Počítačom podporovaný návrh
IR	<i>Infrared Radiation</i>	Infračervené žiarenie
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>	Displej z tekutých kryštálov
NDT	<i>Non-destructive Testing</i>	Nedeštruktívne skúšky
USB	<i>Universal Serial Bus</i>	Univerzálna sériová zbernica

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1-1	Základné technické údaje stroja DPFest 400 [7]	22
Tab. 1-2	Základné technické údaje stroja HIT230F [8]	23
Tab. 1-3	Základné technické údaje stroja CEAST 9340 [9]	24
Tab. 1-4	Doporučené hodnoty rýchlosti zaťažovania [5]	24
Tab. 1-5	Základné technické údaje stroja LabTest 6.500 [12]	25
Tab. 1-6	Základné technické údaje FLIR SC660 [26].....	30
Tab. 2-1	Použité typy laminátov [25]	33
Tab. 3-1	Značenie použitých vzoriek spolu s dopadovými energiami	38
Tab. 3-2	Rozmery trhlín v pozdĺžnom a v priečnom smere pri vizuálnej metóde	40
Tab. 4-1	Rozmery trhlín v pozdĺžnom a v priečnom smere pri termovíznej metóde.....	46
Tab. 5-1	Rozmerová analýza všetkých použitých vzoriek	48
Tab. 5-2	Ohybové vlastnosti skúšaných uhlíkových, sklenených a hybridných kompozitov	49
Tab. 6-1	Relatívne odchýlky v kontrolách medzi vizuálnou a termovíznou metódou.....	51
Tab. 6-2	Porovnanie relatívnych ohybových vlastností testovaných vzoriek	52

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A	Porovnanie skúšobných vzoriek pre rázové skúšky z iných vedeckých prác
Príloha B	Zoznam výkresovej dokumentácie v elektronickej prílohe
Príloha C	Tri základné rozmery nákresu padostroja
Príloha D	Diagram priebehu maximálnych ohybových síl v závislosti na čase

Príloha A

Tab. A Porovnanie skúšobných vzoriek pre rázové experimenty z podobných vedeckých prác

Vedecká práca č.	Typ vlákieň (matrica)	Rozmery vzoriek [mm × mm]	Hrúbky vzoriek [mm]	Počet vrstiev tkaniny	Dopadové energie [J]	Dopadové rýchlosti [m/s]	Priemer impaktora [mm]	Hmotnosť závažia [kg]
[10]	Čadič (epoxid)	180 × 60	3,4 ±0,05	13	5 12,5 25	1,20 1,90 2,69	12,7	6,93
[10]	Uhlík (epoxid)	180 × 60	3,5 ±0,04	13	5 12,5 25	1,20 1,90 2,69	12,7	6,93
[13]	Uhlík (epoxid)	150 × 100	5	40	15 30 45	1,47 2,08 2,55	16	13,89
[14]	Sklo (epoxid)	150 × 100	2,5	6	10	2	12,7 20 25,4 38,1	5
[22]	Uhlík (epoxid)	150 × 120	2,4 4,8 7,2	8 16 24	N N 35	2,2 ÷ 3,1 1,7 ÷ 3,4 3,1 ÷ 4,0	10	5
[23]	Hybrid (epoxid)	101,6 × 101,6	6,35	sklo 9 grafit 16	51,7	4,1	12,7 a 25,4	6,15
[23]	Hybrid (epoxid)	101,6 × 101,6	6,35	sklo 9 grafit 8 sklo 16 grafit 8	51,7	4,1	12,7 a 25,4	6,15
[24]	Hybrid (epoxid)	100 × 100	1,7 ±0,1	uhlík 2 sklo 4 uhlík 2	6 8 10	1,45 1,68 1,87	16	5,7
[24]	Hybrid (epoxid)	100 × 100	1,7 ±0,1	sklo 2 uhlík 4 sklo 2	6 8 10	1,45 1,68 1,87	16	5,7

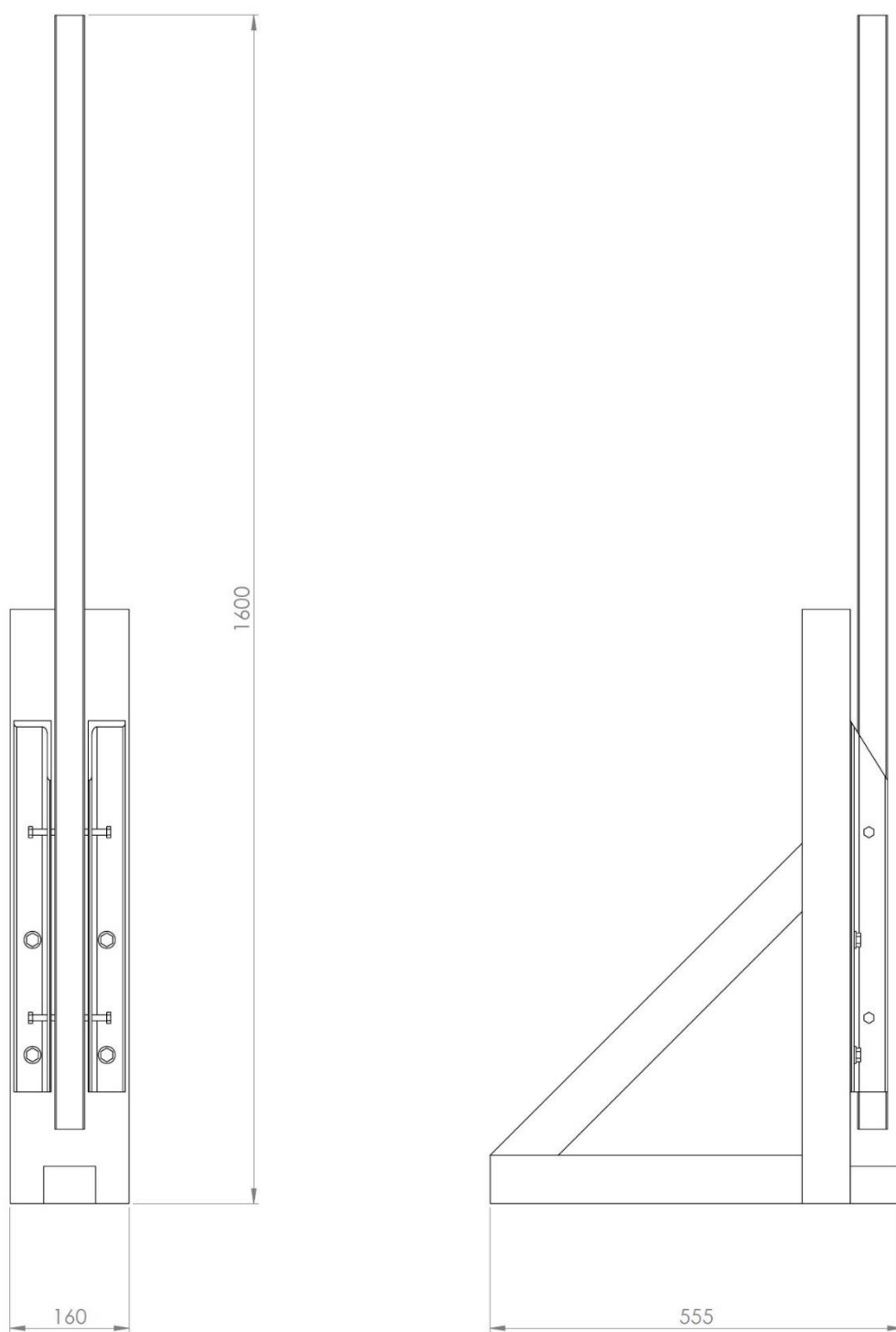
N – nešpecifikované (údaj nebol v práci uvedený)

Príloha B

Tab. B Zoznam výkresovej dokumentácie v elektronickej prílohe

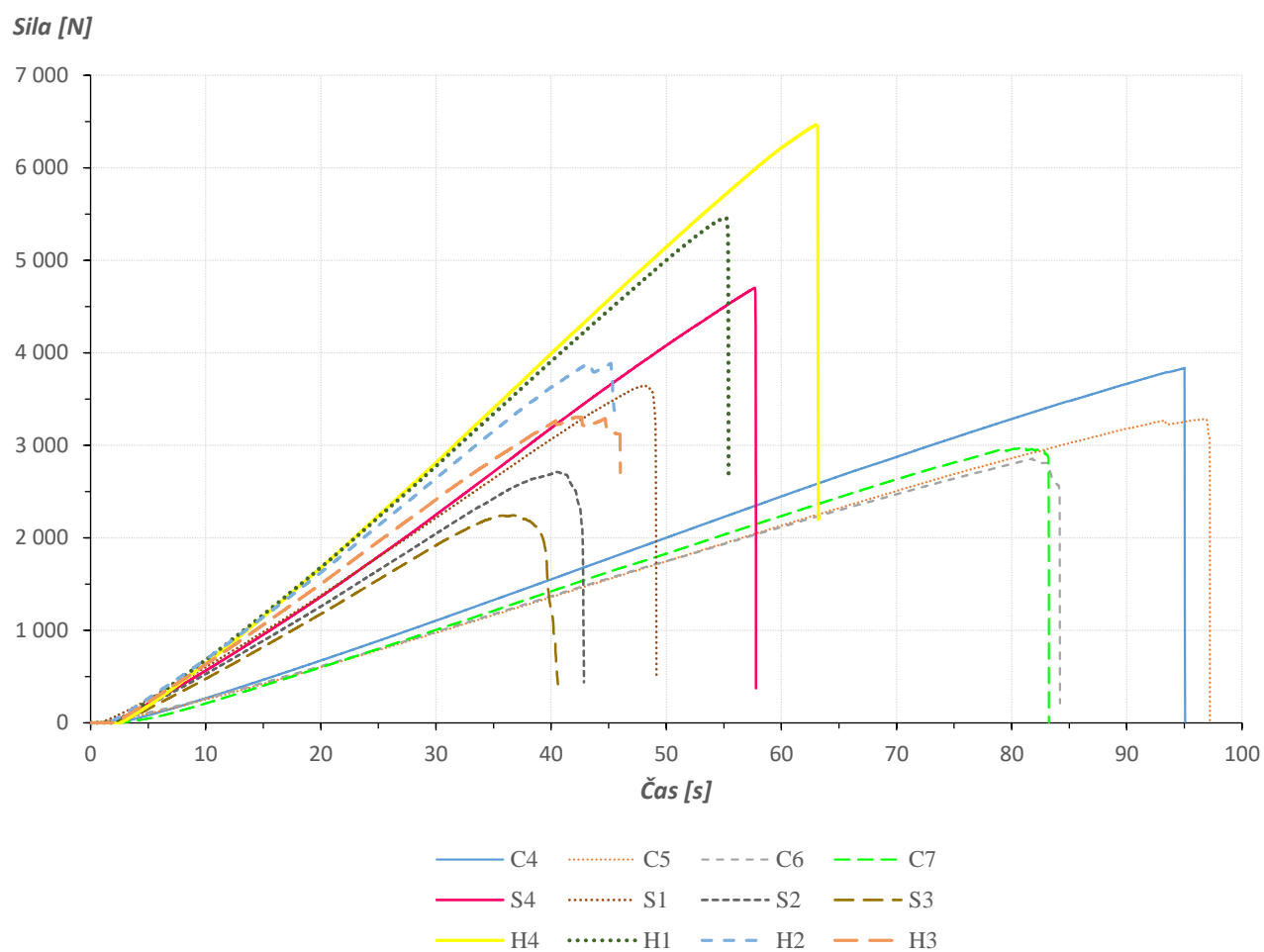
<i>Názov</i>	<i>Označenie</i>
Padajúce závažie - zostava	LU_Z_001
Padajúce závažie - kusovník	LU_K_001
Závažie	LU_S_008
Impaktor	LU_S_009
Tyč	LU_S_010
Posuvník	LU_S_011
 Padostroj - zostava	 LU_Z_002
Padostroj - kusovník	LU_K_002
Podstavec	LU_S_001
Vodiaca trubka	LU_S_002
Rám časť 1	LU_S_003
Rám časť 2	LU_S_004
Rám časť 3	LU_S_005
Pravý uholník	LU_S_006
Ľavý uholník	LU_S_007
 Kovový lem - zostava	 LU_Z_003
Kovový lem - kusovník	LU_K_003
Plochý profil 1	LU_S_012
Plochý profil 2	LU_S_013

Príloha C



Obr. C Tri základné rozmery padostroja (mierka 1:6)
Náčrt bol vytvorený pomocou programu SolidWorks 2017.

Príloha D



Obr. D Diagram priebehu dosiahnutia maximálnych ohybových síl v závislosti na čase. Dáta sú exportované z programu Test&Motion.